

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**IPTV v optických přístupových sítích nové generace**

**IPTV in Optical NGA (Next Generation Access)**

**2013**

**Jiří Kummer**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Jiří Kummer**

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

**IPTV v optických přístupových sítích nové generace  
IPTV in Optical NGA (Next Generation Access)**

Zásady pro vypracování:

Sítě nové generace představují další vývojový krok v oblasti optických přístupových sítích. Cílem absolventské práce je studium distribuce IPTV v sítích nové generace včetně měření kvality za simulovaného provozu v laboratorním prostředí.

1. Současný stav optických přístupových sítích nové generace.
2. Měření parametrů WDM pasivní optické přístupové sítě (Ericsson-Nortel, Release 3).
3. Distribuce IPTV ve WDM pasivní optické přístupové síti prostřednictvím VLC/IP-DVB Streameru.
4. Měření kvality IPTV objektivními metodami (např. MSE, SSIM) za simulovaného provozu WDM pasivní optické přístupové sítě (laboratorní podmínky).
5. Vyhodnocení výsledků měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

PRAT, Josep. *Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research towards unlimited bandwidth access*. Barcelona: Springer, 2008. 187 p. ISBN 978-1-4020-8469-0.

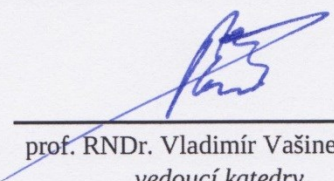
LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Inc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0.

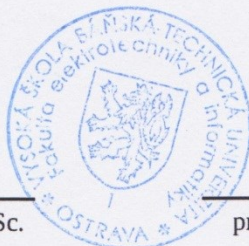
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 07.05.2013

  
prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.  
vedoucí katedry




  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 1.5.2013



podpis studenta

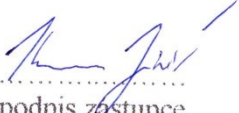
## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. Petru Koudelkovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

## **Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby**

„Souhlasím se zveřejněním této bakalářské práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v bakalářských programech VŠB-TU Ostrava.“

Dne: 1.5.2013

  
.....  
podpis zástupce

## **Abstrakt**

KUMMER, Jiří. *IPTV v optických přístupových sítích nové generace : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra telekomunikační techniky, 2013, 70s. Vedoucí práce: Ing. Koudelka, Petr.

Bakalářská práce se zabývá studiem optických přístupových sítí WDM-PON. V první části práce je teoreticky rozebrán vývoj a trend optických přístupových sítí nové generace. Druhá část se zabývá měřením jednotlivých parametrů na zařízení LG-Ericsson EA 1100, Release 3. Ve třetí části práce se simuluje IPTV provoz z virtuálního serveru k účastnické ONT jednotce na pasivním optickém vedení. Distribuce IPTV je tvořena programem VLC, který vysílá jednotlivá videa pomocí multicastové IP (Internet Protocol) adresy. Poslední část práce se věnuje měření kvality vysílaných videí v simulovaném provozu Triple play, kde je síť různě zatěžována datovým provozem a následným vyhodnocením výsledků objektivními metodami (MSE, SSIM) a metodou EtherSAM.

## **Klíčová slova**

Pasivní optická síť; optická přístupová síť; nové generace; distribuce IPTV; simulace provozu; WDM; objektivní metody; VLC; MSE; SSIM.

## **Abstract**

KUMMER, George. *IPTV in optical NGA: Thesis*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Telecommunications, 2013, 70s. Supervisor: Ing. Koudelka, Peter.

This thesis deals with the study of optical access networks, WDM-PON. The first part is theoretical analyzed and the development trend of optical access networks generations. The second part deals with the measurement of the parameters of the device LG-Ericsson EA 1100, 3rd Release In the third part simulates the IPTV traffic from the virtual server to the subscriber ONT unit for passive optical path. IPTV distribution is made up of VLC, which sends each video using multicastové IP addresses. The last part is dedicated to measuring the quality of broadcast videos in a simulated traffic Triple play, where the network is loaded with different data traffic and subsequent evaluation of the results of objective methods (MSE, SSIM) and the method EtherSAM.

## **Key words**

Passive optical network; optical access network; next generation; distribution IPTV; simulation traffic; WDM; objective methods; VLC; MSE; SSIM.

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
AON	(Active Optical Network)	Aktivní optická síť
APC	(Angled Physical Contact)	Optický konektor
AWG	(Arrayed Waveguide Grating)	Vlnovody uspořádané do mřížky
BMP	(Windows Bitmap)	Formát pro ukládání rastrové grafiky
CAT	(Category)	Kategorie
COM	-	Název portu
CoS	(Class of Service)	Třída služeb
CSV	(Comma Separated Values)	Hodnoty oddělené čárkami
CWDM	(Coarse Wavelength Division Multiplex)	Hrubý vlnový multiplex
DBA	(Dynamic Bus Access)	Dynamický přístup na sběrnici
DHCP	(Dynamic Host Configuration Protocol)	Protokol pro dynamickou konfiguraci hostitelského zařízení
DM	(Dense Mode)	Hustý provoz
DNS	(Domain Name System)	Server doménových jmen
DVB-C	(Digital Video Broadcasting - Cable)	Digitální televizní vysílání šířené kabelem
DVB-S	(Digital Video Broadcasting - Satellite)	Satelitní digitální televizní vysílání
DVB-T	(Digital Video Broadcasting - Terrestrial)	Pozemní digitální televizní vysílání
DWDM	(Dense Wavelength Division Multiplex)	Hustý vlnový multiplex
EAST	(Ethernet Access Service Terminal)	Ethernetový přístupový řídicí terminál
EMS	(Element management system)	Systém pro správu
EPON	(Ethernet Passive Optical Network)	Pasivní optická síť na bázi Ethernetu
FDM	(Frequency Division Multiplex)	Kmitočtový multiplex
FP	(Fabry Perot)	-
FSAN	(Full Service Access Network)	Skupina předních světových poskytovatelů telekomunikačních služeb
FTTB	(Fiber To The Building)	Zakončení vlákna v budově
FTTC	(Fiber To The Curb)	Zakončení vlákna u uživatele
FTTH	(Fiber To The Home)	Zakončení vlákna v obytném prostoru
FTTN	(Fiber To The Node)	Zakončení vlákna ve skříní
FTTx	(Fiber To The x)	Obecný pojem pro všechny druhy poslední míle



<b>Zkratka</b>	<b>Anglický význam</b>	<b>Český význam</b>
GEAPON	(Gigabite Ethernet Passive Optical Network)	Pasivní optická síť na bázi Gigabite Ethernetu
GPON	(Gigabitet Passive Optical Network)	Pasivní optická síť s přenosovou rychlostí 1Gbps
HD	(High-Definition)	Vysoké rozlišení
HDTV	(High Definition TeleVision)	Televize s vysokým rozlišením
HTTP	(HyperText Transfer Protocol)	Hypertextový přenosový protokol
ID	(IDentification)	Identifikace
IEEE	(Institute of Electrical and Electronics Engineers)	Společnost pracovníků v elektrotechnice a elektronice v USA
IGMP	(Internet Group Management Protocol)	Protokol Internetu pro správu skupin
IP	(Internet Protocol)	Standardní síťový protokol
IPTV	(Internet Protocol Television)	Televize vysílající pomocí internetového protokolu
ITU	(International Telecommunication Union)	Mezinárodní telekomunikační unie
L	(Layer)	Vrstva
LAN	(Local Area Network)	Lokální síť
LD	(Laser Diode)	Laserová dioda
LED	(Light Emitting Diode)	Světloemitující dioda
LLMNR	(Link Local Multicast Name Resolution)	Protokol založený na DNS
MPEG	(Moving Picture Expert Group)	Expertní skupina pro pohyblivý obraz
MPQM	(Moving Pictures Quality Metric)	Objektivní metoda
MSAD	(Metric is the mean Absolute Difference)	Objektivní metoda
MDI	(Media Delivery Index)	Objektivní metoda
MSE	(Mean Square Error)	Objektivní metoda
NGA	(Next Generation Access)	Nová generace připojení
NGN	(Next Generation Network)	Síť nové generace
NPC	(Non Physical Contact)	Optický konektor
NT	(Network Termination)	Síťová jednotka
OAN	(Optical Access Network)	Optická přístupová síť
ODN	(Optical Distribution Network)	Optická distribuční síť
OFDM	(Orthogonal Frequency Division Multiplex)	Ortodoxální multiplex
OLT	(Optical Line Termination)	Optické linkové zakončení
ONT	(Optical Network Termination)	Optická síťová jednotka
ONU	(Optical Network Unit)	Optická ukončovací jednotka
OoS	(Out of Sequence)	Přijetí dat mimo pořadí

<b>Zkratka</b>	<b>Anglický význam</b>	<b>Český význam</b>
ORG	(Optical Transmission Group)	Skupinový přenos
OS	(Operating System)	Operační systém
OSA	(Optical Spektral Analyzer)	Optický spektrální analyzátor
PC	(Person Computer)	Osobní počítač
PHP	(Hypertext Preprocessor)	Skriptovací jazyk na straně serveru zvláště určený pro vývoj webových aplikací
PI	(PON Interface)	Název portu
PIM	(Protocol Independent Multicast)	Protokol Internetu pro správu skupin
PON	(Passive Optical Network)	Pasivní optická síť
PSNR	(Paek Signal to Nois Ratio)	Objektivní metoda
QoS	(Quality of Service)	Kvalita služeb
RFC	(Request For Comments)	Označení řady standardů popisujících internetové protokoly, systémy apod.
RTP	(Real-time Transport Protocol)	Protokol standardizující paketové doručování zvukových a obrazových dat
SBA	(Statically Bus Access)	Statický přístup na sběrnici
SC	(Single Contact)	Optický konektor
SDH	(Synchronous Digital Hierarchy)	Přenosová technologie
SDTV	(Standard Definition TeleVision)	Televize se standardním rozlišením
SFP	(Small form Factor Pluggable)	Technický standard optických vložitelných transceiverů
SLA	(Service Level Agreement)	Smlouva o kvalitě poskytovaných služeb
SM	(Sparse Mode)	Řídký režim
SNR	(Signal to Noise Ratio)	Odstup signálu od šumu
SSIM	(Structural similarity index)	Objektivní metoda
SSM	(Single Source Multicast)	Filtrování podle zdroje
SW	(SWitch)	Přepínač
TDM	(Time Division Multiplex)	Časový multiplex
TDMA	(Time Division Multiple Access)	Vícenásobný přístup s časovým dělením
TTL	(Time To Live)	Nastavená maximální doba životnosti datagramu v síti
UDP	(User Datagram Protocol)	Protokol druhé vrstvy TCP/IP
UDWDM	(Ultra Dense Wavelength Division Multiplex)	Ultra jemný vlnový multiplex
USB	(Universal Serial Bus)	Univerzální sériová sběrnice
UTP	(Unshielded Twisted Pair)	Nestíněná kroucená dvojlinka
VLAN	(Virtual Local Area Network)	Virtuální LAN
VoIP	(Voice Over IP)	Telefonie přes IP

<b>Zkratka</b>	<b>Anglický význam</b>	<b>Český význam</b>
VQM	(Video Quality Metric)	Objektivní metoda
VŠB-TUO	-	Vysoká Škola Báňská – Technická Universita Ostrava
WDM	(Wavelength Division Multiplex)	Vlnový multiplex
WPF	(Wavelength Passive Filter)	Pasivní filtr vlnových délek
xDSL	(xDigital Subscriber Line)	Označení rodiny technologií pro modemové komunikace po telefonním čtyřdrátu
YUV	-	Barevný model používaný v televizním vysílání

---

## Obsah

1	Úvod.....	2
2	Přístupové optické sítě a jejich dělení .....	3
2.1	Topologie sítí.....	4
2.1.1	Bod - bod (Point to Point).....	4
2.1.2	Mnohobodové (Point to Multipoint) .....	4
2.1.3	Typy sítí.....	4
2.2	Způsob zakončení koncové jednotky .....	5
2.3	Technologie přenosu kanálu .....	5
2.3.1	TDM – časový multiplex .....	5
2.3.2	WDM – vlnový multiplex.....	7
3	PON - Pasivní optická síť .....	8
4	Pasivní optické sítě nové generace.....	9
4.1	NGA1 .....	10
4.1.1	XG-PON1 .....	10
4.1.2	XG-PON2 .....	11
4.2	NGA2 .....	11
4.2.1	WDM-PON.....	11
4.2.2	WDM-TDM-PON .....	14
5	Praktické měření parametrů WDM-PON .....	15
5.1	Popis experimentálního pracoviště .....	15
5.1.1	Ericsson-Nortel, EAST 1100 Release 3.....	15
5.1.2	LG-Ericsson WPF 1132c.....	17
5.1.3	Dělič .....	17
5.1.4	LG-Ericsson EARU 1112 .....	17
5.1.5	Optická vlákna .....	18
5.1.6	Simulátor vedení FVA-60B .....	18
5.2	Popis měřících přístrojů.....	18
5.2.1	EXFO FTB-400.....	18
5.3	Výsledky měření .....	19
5.3.1	Měření útlumů.....	19
5.3.2	Měření optickým spektrálním analyzátozem.....	20

---

6	Distribuce IPTV .....	22
6.1	Používané protokoly pro IPTV .....	23
6.1.1	IGMP .....	23
6.1.2	PIM .....	24
6.2	Používané kodeky pro IPTV .....	25
6.2.1	MPEG-2/H.262 .....	25
6.2.2	MPEG-4/H.264 .....	25
7	Streamování videa .....	26
7.1	Způsob streamování .....	26
7.1.1	Unicast .....	26
7.1.2	Multicast .....	26
7.2	Vytvoření a příjem streamu .....	27
7.2.1	Server Abacuc .....	27
7.2.2	Virtuální stroj .....	28
7.2.3	Router ZyXEL XGS-4528F .....	29
7.2.4	Koncové zařízení – notebook Acer .....	30
8	Hodnocení kvality .....	31
8.1	Kvalita služeb QoS .....	31
8.1.1	Celkové zpoždění (latency) .....	31
8.1.2	Změna pořadí paketů (packet order) .....	31
8.1.3	Kolísání zpoždění (jitter) .....	31
8.1.4	Ztrátovost paketů (packet loss) .....	31
8.1.5	Propustnost (bandwidth) .....	31
8.1.6	Zpoždění (delay) .....	32
8.2	Objektivní metoda k hodnocení kvality obrazu a videosignálu .....	32
8.2.1	MSE .....	32
8.2.2	SSIM .....	32
8.3	MSU Video Quality Measurement .....	33
8.4	Bitrate Viewer .....	33
9	Simulace provozu a měření kvality IPTV .....	34
9.1	Testovací videosekvence .....	34
9.2	Hodnocení kvality objektivními metodami .....	34
9.2.1	Postupné snižování propustnosti přístupové sítě .....	35

---

---

9.2.2	Postupné zvyšování vzdálenosti přístupové sítě .....	37
9.2.3	Postupné zatěžování ONU jednotek .....	38
9.2.4	Postupné zatěžování portů u ONU jednotky .....	39
9.3	Hodnocení kvality metodou EtherSAM .....	40
10	Vyhodnocení výsledků měření .....	41
10.1	Vliv propustnosti na kvalitu IPTV .....	41
10.2	Vliv vzdálenosti na kvalitu IPTV .....	43
10.3	Vliv zatížení na kvalitu IPTV .....	44
10.4	Porovnání výsledků objektivní metody se standartem EtherSAM .....	44
11	Závěr .....	45

# 1 Úvod

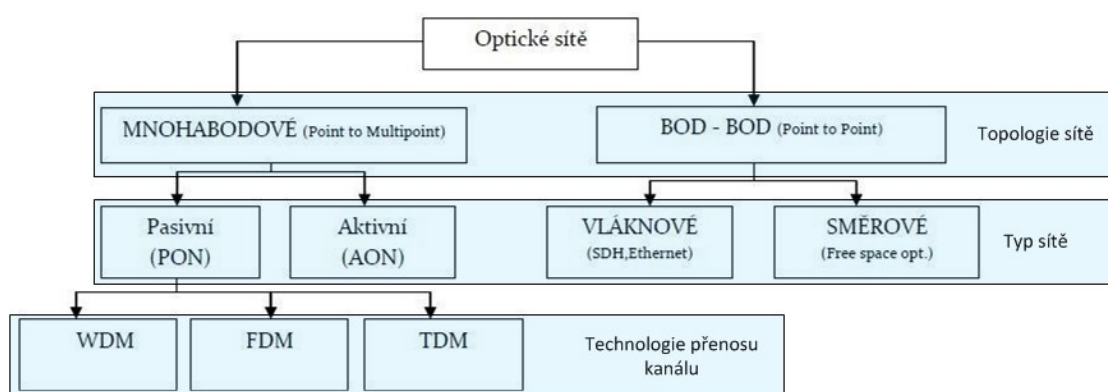
Evoluce informační a komunikační technologie je nezastavitelná. Tato evoluce se projevuje neustálým zvyšováním kvality služeb, což sebou nese i požadavek nárůstu přenosové rychlosti. Dříve, kdy zejména služby Triple play, potřebovaly pro svou činnost desítky Mbps jsou dávno pryč. Dnešní služby v Triple play představují IPTV (Internet Protocol Television) ve vysokém rozlišení, obrovské přenosy dat v internetu a v neposlední řadě i HD (High-Definition) video hovory ve VoIP (Voice Over IP), potřebující k bezchybné funkci stovky Mbps. Proto bylo nutné zlepšit technologii současných PON jakou jsou EPON (Ethernet Passive Optical Network) a GPON (Gigabit Passive Optical Network), příp. GEPON (Gigabit Ethernet Passive Optical Network), a nahradit je pasivními optickými sítěmi nové generace, jejichž funkci rozebírám v předních kapitolách bakalářské práce.

Nejznámější technologie z nové generace je WDM-PON, která pracuje na rozdělení kanálu pomocí více vlnových délek. Toto rozdělení je závislé na použití dané technologie a to buď CWDM nebo DWDM, které nám určují šířku jednoho kanálu. Díky VŠB-TUO (Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava) a Katedře telekomunikací jsem měl možnost tuto technologii, jmenovitě OLT jednotku Ericsson-Nortel, Release 3, vyzkoušet a pomocí ní distribuovat službu IPTV. K samotnému měření jsem dále využil měřicí zařízení od firmy EXFO.

V praktické části byla uskutečněna distribuce IPTV za pomoci freeware programu VLC v OS (Operating System) Ubuntu 12.10. Samotná distribuce služby IPTV probíhala pomocí multicastového přenosu, který je nejvýhodnější pro realizaci této služby. Měření probíhá ve vytvořeném simulovaném provozu, tedy spuštěním IPTV a download a upload z datového serveru. Každá videosekvence je v tomto provozu spuštěna samostatně, protože se liší svou kvalitou a kompresí. Na výstupu kontroluji přijímanou videosekvenci a její změnu kvality vyhodnocuji pomocí objektivních metod SSIM (Structural similarity index) a MSE (Mean Square Error). Dále pak použitím standardu Ether SAM.

## 2 Přístupové optické sítě a jejich dělení

Přístupová síť spojuje poskytovatele se zákazníkem a umožňuje mu přístup k poskytovaným službám. Tyto sítě (viz. obr. 2.1) jsou standardizované u ITU-T (International Telecommunication Union) a IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). V současné době převládá metalické vedení, které se používá již několik let, ale přestává stačit v náročnosti rychlosti přenosu dat, které se začínají pohybovat v řádově desítkách Gbps. Trendem dnešní doby je rozvoj multimediálních služeb, mezi které například patří, velmi kvalitní přenos IPTV, přenos objemných dat mezi zákazníky a v nemalé míře video hovory ve VOIP. Tyto nároky řeší optické vedení založené na optických vláknech, a proto začíná vytlačovat stávající metalické vedení.



Obrázek 2.1: Rozdělení optických přístupových sítí

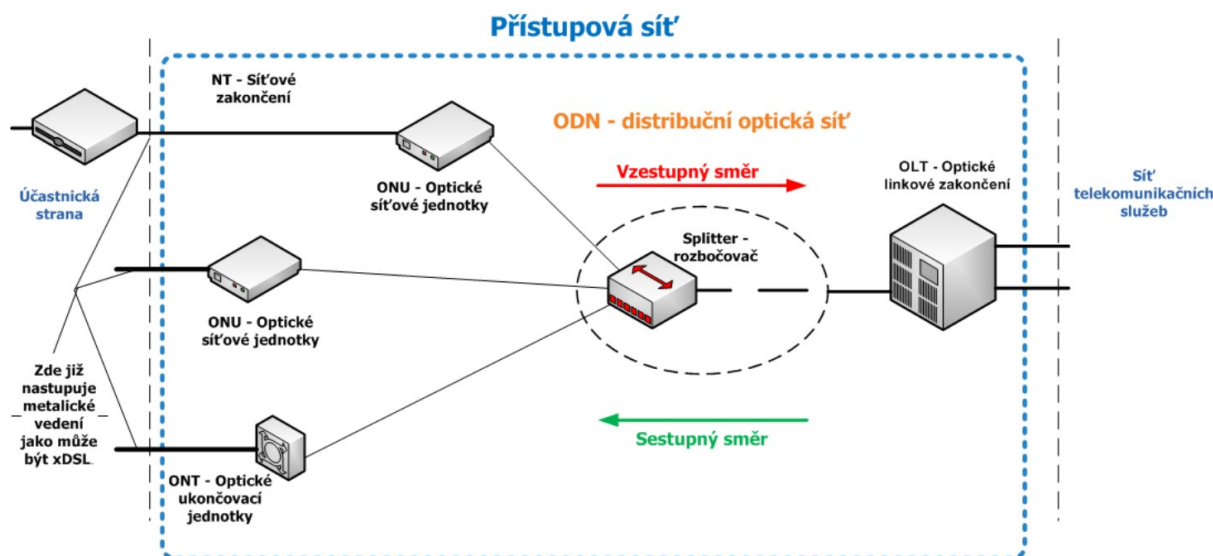
### Základem všech optických sítí jsou tyto prvky:

- Vysílač - zdroj záření, který využívá PN přechod v propustném směru, pomocí LD (laser dioda) nebo LED (Light Emitting Diode).
- Médium - optické vlákno, ve kterém jsou bity přenášeny zářením ve formě fotonu.
- Přijímač - detektor optického záření, který využívá PN přechod v závěrném směru.

### Základní části optických sítí

- **Optické linkové zakončení** - **OLT** (Optical Line Termination), zajišťující funkce síťového rozhraní mezi přístupovou sítí a sítěmi telekomunikačních služeb.
- **Optická distribuční síť** - **ODN** (Optical Distribution Network), což je soubor optických přenosových prostředků mezi OLT a jednotkami ONU.
- **Optické ukončující jednotky** - **ONT** (Optical Network Termination), zabezpečující funkce účastnického rozhraní mezi koncovými zařízeními účastníků a přístupovou sítí.
- **Optické síťové jednotky** – **ONU** (Optical Network Unit – **ONU**), zabezpečující funkce rozhraní mezi optickou a metalickou částí přístupové sítě. Dále může navazovat síťové zakončení – **NT** (Network Termination) [8].





Obrázek 2.2: Zobrazení pasivní přístupové optické sítě

## 2.1 Topologie sítí

Optické přístupové sítě se dle způsobu použití dělí na Bod-bod a Mnohabodové technologie. Jednotlivé technologie se aplikují v závislosti na počtu koncových účastníků [7].

### 2.1.1 Bod - bod (Point to Point)

Tato technologie je nejlépe realizovatelná. Spočívá v přímém propojení poskytovatele a koncové jednotky. Propojení může být vytvořeno dvěma vlákny pro duplexní přenos, přičemž v jednom vláknu probíhá downstream a v druhém upstream. Pokud je spojení vytvořeno pouze jedním vláknem musíme zařadit spektrální multiplex, kde je downstream a upstream oddělen specifickými vlnovými délkami, proto se tato varianta řadí mezi AON.

### 2.1.2 Mnohabodové (Point to Multipoint)

Pokud je potřeba vytvořit větší připojení účastníků bylo by zapojení mnoho optických vláken značně neefektivní. Pro tuto situaci je využito mnohabodové technologie, která je oproti technologii Bod-bod obtížněji realizovatelná, ale snižuje náklady na optické vedení. Do sítě je zařazen rozbočovací prvek, který dělí jedno vlákno na více vláken podle počtu koncových jednotek. Dle použití rozbočovacího prvku dělíme tuto technologii na pasivní a aktivní.

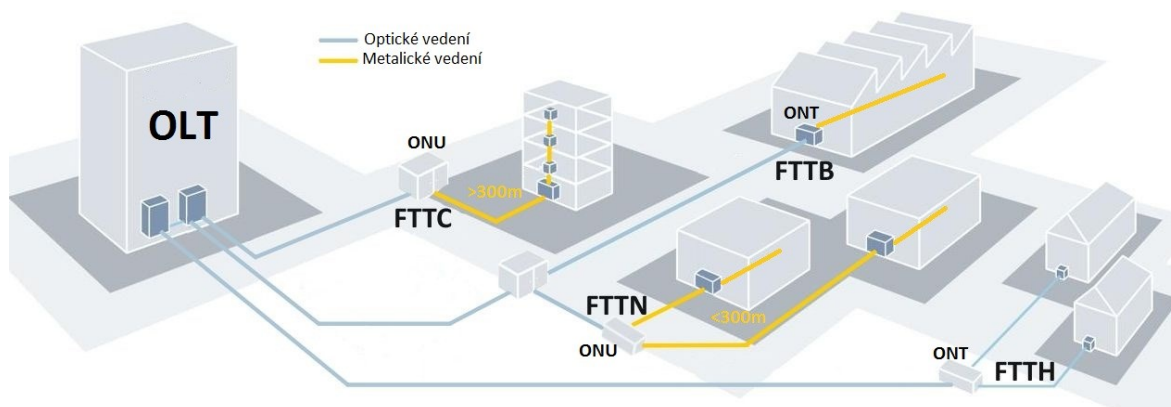
### 2.1.3 Typy sítí

Optické přístupové sítě dělíme na dvě skupiny. Dle způsobu distribuce signálu ke koncovým uživatelům, na pasivní síť PON (Passive Optical Network) a aktivní síť AON (Active Optical Network). Ve většině případů převládá skupina pasivních optických sítí. Tyto sítě ke svému provozu nepotřebují aktivní prvky, které používají elektrickou energii, s výjimkou na hlavních a koncových optických jednotkách, kde si pasivitou prvků nevystačíme. Další skupinou jsou sítě AON, které na svou činnost využívají optické zesilovače, regenerátory signálu apod., proto dokáží vysílat na větší vzdálenosti a dosahují většího dělicího poměru, tudíž můžeme distribuovat signál více koncovým uživatelům.

## 2.2 Způsob zakončení koncové jednotky

V závislosti na způsobu zakončení koncové jednotky (ONU), rozlišujeme jednotlivé typy sítě FTTx (Fiber To The x). Kde „x“ je bod, který rozděluje optické a metalické vedení, podle toho v jaké míře je optické vlákno v trase použito [8].

- FTTN (Fiber To The Node), přípojka je ukončená v uzlu, který je umístěn od první NT jednotky, v jednotkách až desítkách kilometrů. Dosahuje rychlosti downstream 25 – 50 Mbps a upstream 2 – 10 Mbps.
- FTTC (Fiber To The Curb), přípojka je ukončená v účastnickém rozvaděči, který je od první NT jednotky do 300 metrů. Dosahuje rychlosti downstream 50 – 100 Mbps a upstream 5 - 15 Mbps.
- FTTB (Fiber To The Building), přípojka je vedena přímo do budovy, kde jsou umístěny ONU jednotky. Po budově jsou data vedena po metalických rozvodech. Dosahuje rychlosti downstream a upstream 1 Gbps.
- FTTH (Fiber To The Home), optická vlákna jsou zavedena až ke koncovým bodům sítě, tj. až na účastnické zásuvky, tato technologie nabízí kapacitu od 1 Mbps do 10 Gbps.



Obrázek 2.3: Infrastruktura FTTx

## 2.3 Technologie přenosu kanálu

Abychom mohli jedno optické vlákno využít vícenásobně, a to mohlo současně komunikovat s více účastníky najednou, musíme zavést multiplexování, které v optických přístupových sítích dělíme zejména na časový multiplex TDM (Time Division Multiplex) a multiplex vlnových délek WDM (Wavelength Division Multiplex).

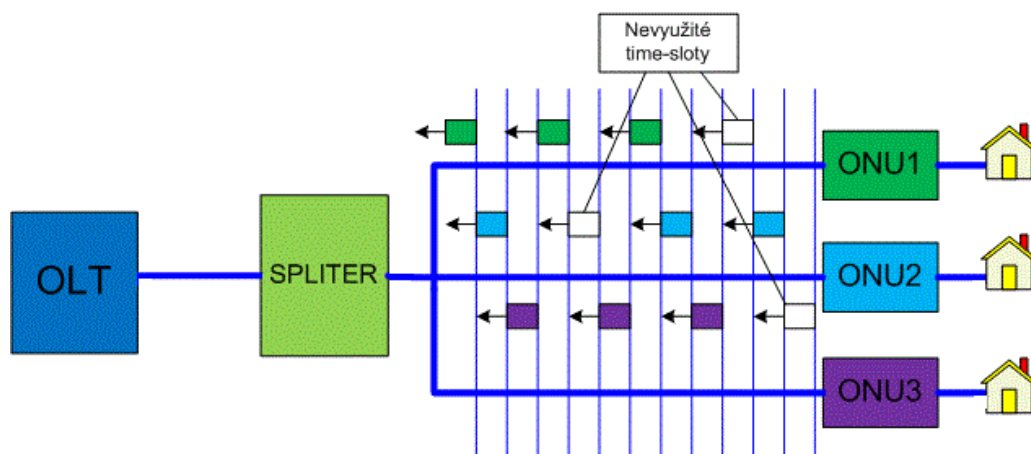
### 2.3.1 TDM – časový multiplex

Momentálně nejpoužívanější způsob technologie pro propojení více koncových jednotek na jedno optické vlákno. Technologie je založena na časovém multiplexování optických signálů, které přijdou od uživatele a následně se spojí v jeden signál, který projde optickou trasou až do OLT jednotky. Zde je demultiplexem rozkódován zpět na jednotlivé kanály [5].

## Podle přidělování šířky pásma se technologie TDM dělí:

### Statické – SBA (Statically Bus Access)

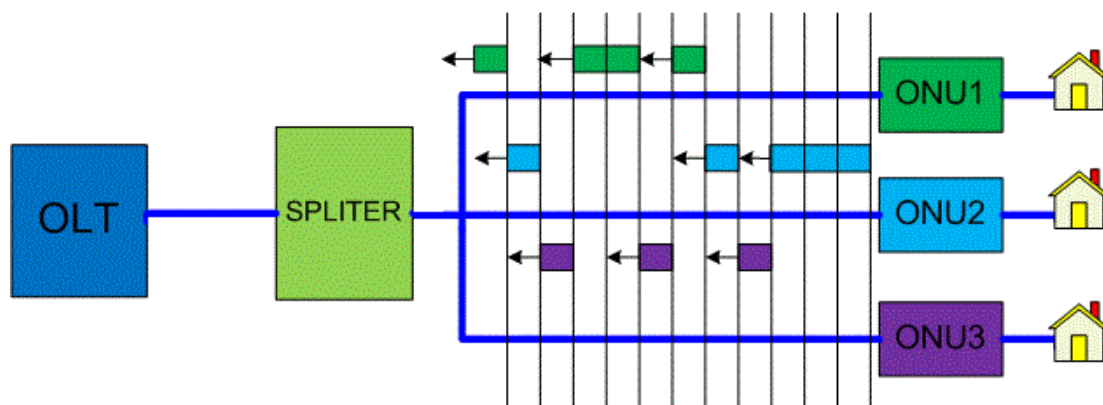
Princip přerozdělování šířky pásma je založen na pevném přidělení kanálu každé ONU jednotce. To znamená, že v každém časovém intervalu dostane prostor pro přenos dat právě jedna ONU jednotka, a to bez rozdílu zda chce nebo nechce přenášet data. Způsob je bezztrátový jen v případě komunikace všech ONU jednotek, za předpokladu že některá ONU jednotka nevysílá, posílají se prázdné kanály, které mohly být využity jinou ONU jednotkou [5].



Obrázek 2.4: Statické přidělování šířky pásma

### Dynamické – DBA (Dynamic Bus Access)

Dynamické přidělování šířky pásma zajišťuje plné využití kapacity systému a dává prostor jen ONU jednotkám, které chtějí komunikovat. Systém je založen na kombinaci postupného měření provozu a na základě přijatých žádostí o komunikaci. Každá ONU jednotka musí mít přidělenou prioritu služeb, v závislosti na ní má právo přenosu dat před ostatními [5].



Obrázek 2.5: Dynamické přidělování šířky pásma

Časový multiplex se rozděluje na několik systému, které se od sebe odlišují zejména v maximální délce dosahu a rychlosti přenosu a to APON/BPON, GPON, EPON, 10GEPON.

### 2.3.2 WDM – vlnový multiplex

Vlnové dělení je založeno na rozdělení signálů podle vlnové délky. Před ITU-T standardizací bylo považováno za WDM dva (nebo více) signálů sloučených do jedné vlnové délky a následně přenášeno v pásmu 1550 nm nebo 1310 nm. Snaha vylepšit tuto technologii vedla ke sdružení více optických signálů, které by se mohly současně přenášet po jednom vláknu pomocí vlnového multiplexu.

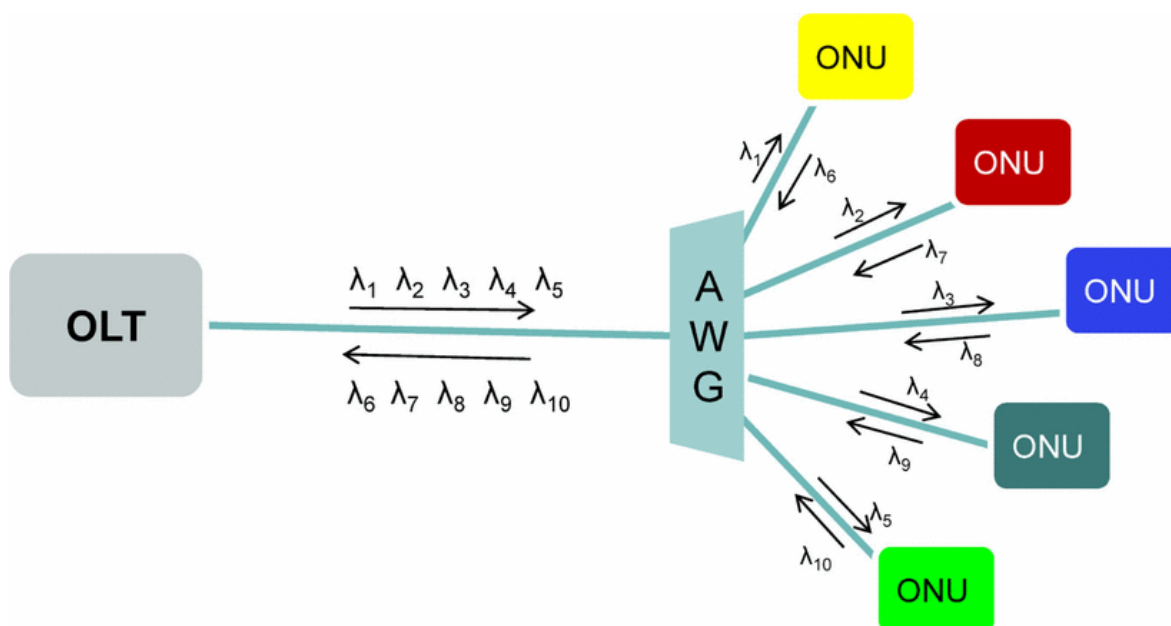
Tato technologie zatím umožňuje nejrychlejší přenos dat po jednom vláknu. Využívá pro přenos více optických signálů s vlastní vlnovou délkou, které se mohou nerušeně přenášet po jednom optickém vláknu, a proto nám umožňuje mimořádné zvýšení kapacity přenosových systémů. Odstup mezi jednotlivými vlnovými délkami kanálů závisí na technologii, které jsou implementovány v přenosové cestě. Podle standardizace ITU-T tyto technologie dělíme na CWDM a DWDM, s roztečí odstupů 0,4 – 20nm v rozmezí 1270 nm až 1610 nm. Transparentnost přenosu optických signálů umožňuje přenášet data od 140 Mbps do 10 Gbps [3].

#### Klíčové prvky:

- AWG (Arrayed Waveguide Grating) multiplexor / demultiplexor nebo rozbočovač (splitter).
- Zdroj širokopásmového světla.

#### Výhodou WDM v praxi je:

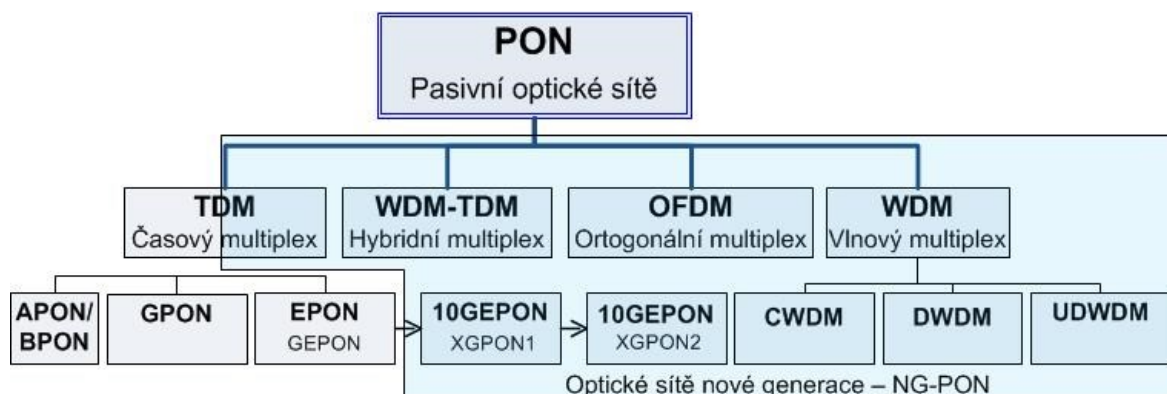
- Oddělení služeb, komunikace přesměrování.
- Regulace zvýšení kapacity kanálu, zadání vlnové délky kanálů.
- Statické přidělování, semi-statické přidělování, dynamické přidělování.



Obrázek 2.6: Princip WDM

### 3 PON - Pasivní optická síť

Distribuce optického signálu bez nutnosti zesilovače nebo dekodéru, který by musel převádět optický signál na elektrický a naopak. V těchto místech by se signál mohl zkreslovat a převáděním zpomalovat. Signál, který vede od optického linkového zakončení (OLT) směrem k zákazníkovi, je rozdělován pomocí pasivního rozbočovače (splitter), který může přerozdělovat signál v dělicím poměru 1:2 až 1:128, podle počtu připojených ONU jednotek a kaskádově je řadit za sebou. Musíme ovšem počítat s útlumem, který rozbočovač způsobuje a dodržovat doporučení ITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunication standardization sector), které upravuje hodnoty útlumu vložené do optické trasy použitím rozbočovačů. Signál, který obdrží optická síťová jednotka (ONT), je kompletní signál, ze kterého si vybere pouze ten kanál, který jí patří. Tato optická síť je řešena pomocí technologie FTTx, která se rozlišuje podle toho kde je umístěna optická síťová jednotka (ONU) [5].

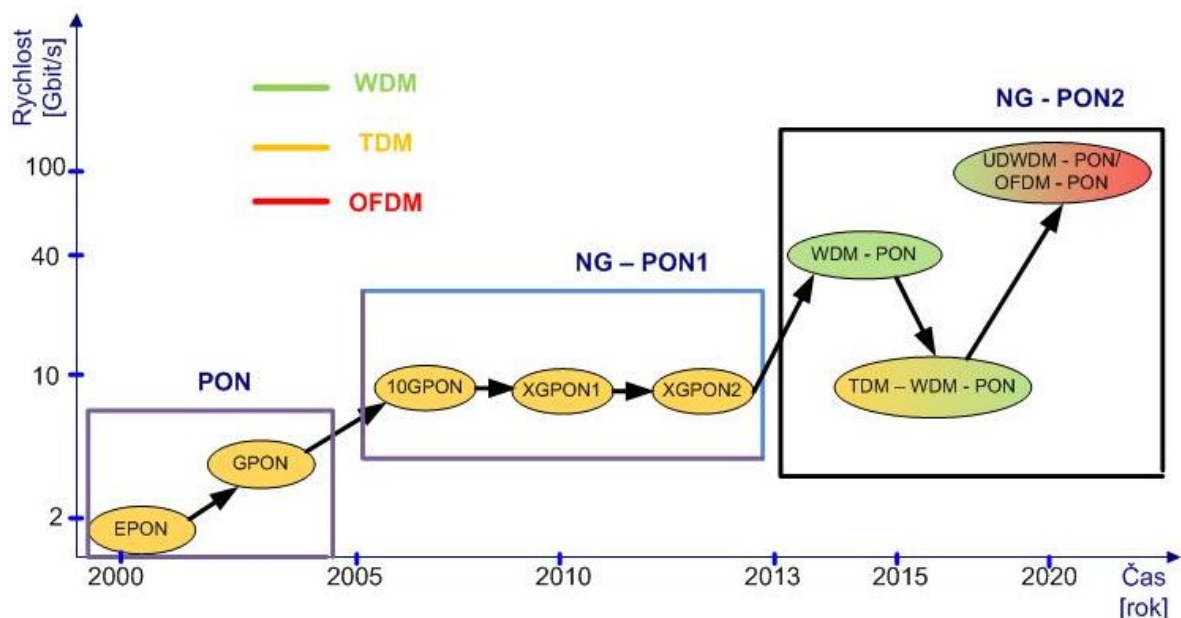


Obrázek 3.1: Rozdělení pasivní optické sítě

## 4 Pasivní optické sítě nové generace

Následující technologie se řadí mezi optické sítě nové generace. K těmto novým metodám se přistupuje především kvůli takřka exponenciálnímu růstu datového provozu a zvyšování nároků na přenosovou rychlost. Mooreův zákon předpokládá až sedminásobný nárůst objemu dat na celém světě v rozmezí let 2010 až 2015 [11]. Hlavním cílem budoucího vývoje je tedy snížení celkových nákladů (provádění multiplexování s omezenou složitostí) a zajištění neznámých budoucích požadavků, které se budou neustále zvyšovat.

Přístupové sítě nové generace jsou nástupci stávajících pasivních optických sítí, které v případě FTTN doplňují stávající metalickou přístupovou síť nebo za použití technologie FTTH jsou složeny pouze z optických prvků. Jsou založeny na paralelním přenosu většího množství optických signálů různých vlnových délek ve společném optickém vlákně [3].



Obrázek 4.1: Vývoj pasivních optických sítí [1].

### Výhody:

- WDM-PON může přepravovat signály s velmi odlišnými vlastnostmi (např. bitrate).
- Vysoký poměr rozdělení řádově stovky uživatelů.
- Vysoká rychlost (> 10 Gbps).
- Obousměrný přenos symetrickou rychlostí přenosu dat.
- Velmi dlouhý dosah (> 20 km).
- Pasivní, nejsou nutné žádné zesilovače a napájení prvků.
- Jednoduchý upgrade a centrální správa.
- Dynamické přidělování zdrojů.



**Nevýhody:**

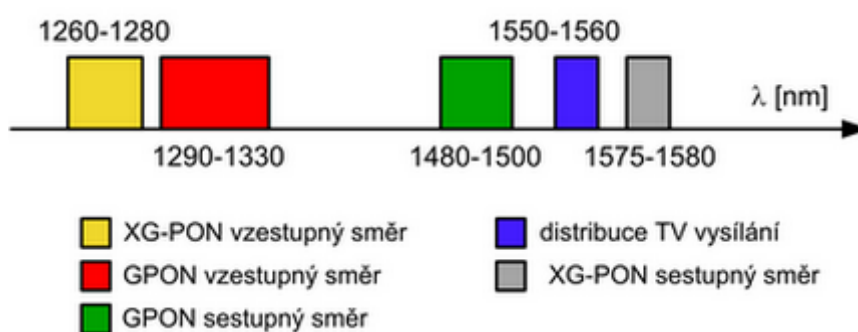
- Přechod ze staré generace na novou. V případě nasazení NG-PON na nynější PON, musí být zajištěna zpětná kompatibilita.
- Multiplexor musí být dost výkonný, aby mohl zvládnout všechny jednotlivé signály.
- Drahý přechod ze staré generace na novou.

**4.1 NGA1**

První generace přístupových sítí byla zavedena v roce 2010 společnostmi FSAN (Full Service Access Network) a ITU-T jako okamžitá aktualizace stávajících optických sítí, oproti druhé generaci, která se zabývá dlouhodobým vývojem v řešení PON. Je to kompromis mezi investicí na přestavbu sítě a novými technologiemi. Z hlediska nákladů budování přístupových sítí jsou totiž nejnákladnější optické distribuční sítě OLT. Představují až 70% u celkové investice. Proto je zásadní aby první generace byla plně kompatibilní s použitými systémy GPON. Má stejné rámce na spojové vrstvě a totožné řízení [10].

**4.1.1 XG-PON1**

Navržená generace byla řešena unií ITU-T tak, aby nově vzniklá varianta XG-PON1 (ITU T G.987), známá také pod názvem 10G-PON, mohla být zpětně kompatibilní s předchozí variantou GPON bez nutnosti výměny ODN. Konečná specifikace této varianty vychází z některých požadavků a doplňků, které bylo nutno pozměnit v původní variantě GPON. Aby mohla fungovat zpětná kompatibilita bylo nutno specifikovat a vhodně zvolit jednotlivá pásma vlnových délek pro přenos ve směru sestupném (downstream) i vzestupném (upstream). (viz. obr. 4.2) .



Obrázek 4.2: Koexistence XG-PON a GPON

V doporučení G. 987 byl specifikován požadavek na maximální rozbočovací poměr a to 1:256, který i tak umožňuje připojit do sítě čtyřnásobně více uživatelů, než bylo možno u varianty GPON. GPON disponovala maximální rozbočovací hranicí 1:64. Fyzický dosah mezi centrální OLT jednotkou a nejvzdálenější ONU/OLT jednotkou byl ustanoven do 20 km. V budoucnu dosáhne až hranice 40 km.

Další výraznou změnou oproti předchozí generaci je silnější systém zabezpečení. Od tohoto systému bylo v GPON upuštěno, za předpokladu dané technologie, která je založena na tom, že provoz

nemůže být odposloucháván. Nicméně provedená měření a průběžné testy shledaly, že při mimořádných podmínkách, jako je například špatná kvalita vláken nebo nečistota konektorů, může ve vzniklých mezerách docházet k odrazu signálu mimo optické vlákno. Právě tady může být zachycen třetí stranou a odposloucháván. Proto bylo v nové variantě XG-PON aplikováno zabezpečení dat pomocí systému bezpečné výměny šifrovacích klíčů a zejména pokročilá metoda vzájemné identifikace koncových optických jednotek ONU/ONT i centrální jednotky OLT a jejich častá a náhodná aktualizace. K ještě větší úspoře bylo v této variantě zavedeno několik úsporných režimů, které postupně uspávají jednotlivé prvky v síti.

Tento standard přichází s přenosovou, asymetrickou rychlostí downstream 10Gbps a pro upstream 2,5Gbps.

#### 4.1.2 XG-PON2

Další navržená generace XG-PON2 (ITU-T G.987), známá také pod názvem 10G-PON, přichází s přenosovou symetrickou rychlostí downstream 10Gbps a pro upstream 10Gbps. Ovšem vyžaduje větší nároky na lasery na ONU jednotkách, které se projeví na pořizovacích nákladech.

### 4.2 NGA2

Průmyslová pracovní skupina FSAN (Full Service Access Network), která je složená z 85 světových významných operátorů, akceptovala v závěru roku 2012 doporučení podle ITU-T NG-PON2. Tato nová norma má být ratifikována do roku 2013. Bude především založena na vlnovém multiplexu WDM. Poskytne zvýšení kapacity a počet poměru kanálů v počátcích až čtyřnásobně a v budoucnu až desetinásobně.

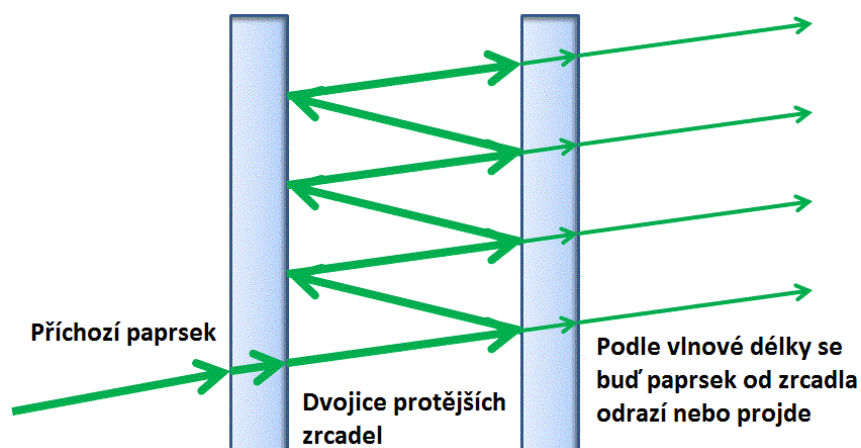
Předpokládá se plná integrace vlnového multiplexu WDM a vytvoření hybridních WDM TDMA PON přístupových sítí. Teoreticky navržená varianta spadající do koncepce NGA2, tak bude např. dosahovat sdílených přenosových rychlostí až 40 Gbps (dle současného plánu uvažovány 4 vlnové délky po 10 Gbps nebo 40 vlnových délek po 1 Gbps). Ovšem za cenu zcela nového návrhu a koncepce bez možnosti zpětné kompatibility s předchozími generacemi sítí [12].

#### 4.2.1 WDM-PON

WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing-Passive Optical Network) je výhodná ekonomická technologie poskytující nadstandartní výkon a flexibilitu, nezbytnou pro nově vznikající business aplikace, a zvětšující se nároky koncových zákazníků. Jsou nejlepším kandidátem pro NG PON2, protože rozšiřují možnosti přenosu po jednom vlákne. Umožňují do jednoho vlákna umístit větší počet oddělených vlnových délek, pomocí toho se několikanásobně zvětší celková kapacita. OLT a ONU jednotky vyberou požadovanou vlnovou délku pomocí koherentní detekce. To znamená, že OLT a ONU jednotky začnou přijímat jen tehdy, pokud normalizované oscilované světlo spolu se světlem daného signálu, splní koherentní podmínky frekvence, fáze a polarizace [10].

Aby ONU jednotky mohly být univerzální a mohly komunikovat na libovolné vlnové délce, je použit mnohamódový FP (Fabry Perot) laser. Pokud do FP laseru dorazí paprsek světelného záření, FP laser se naladí na tuto vlnovou délku a následně ji zesílí a odrazí zpět. Tento proces využívá dvojici zrcadel, které jsou umístěny na koncích FP dutiny (viz. obr. 4.3) [13].

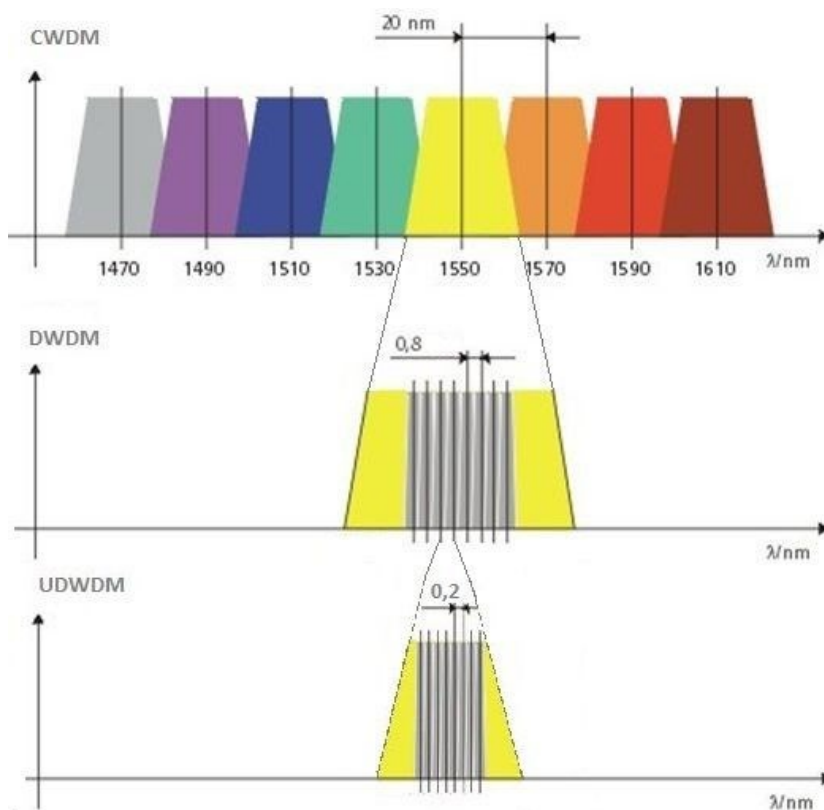




Obrázek 4.3: Fabry – perotova dutina

Podle varianty odstupu vlnových délek, které jsou uvedeny v tabulce (viz. tab. 3), je odvozen počet uživatelů, které mohou současně a nezávisle komunikovat na jednom vlákne bez rizika odposlechu či špionáže.

#### Dělení vlnových multiplexů:



Obrázek 4.4: Technologie vlnových multiplexorů

## CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex)

Tento systém byl vytvořen jako úspornější, ale robustnější varianta pro DWDM aby mohla být technologie WDM více finančně dostupnější. Zaměřuje se hlavně na metropolitní síť

Na tuto technologii nejsou kladeny vysoké nároky a tolerance je mnohem vyšší na úkor horších vlastností při přenosu dat na vzdálenosti jen desítky km. Nevyžadují teplotní stabilizaci, došlo ke snížení odstupů až na 20nm a 2,5 THz, tudíž můžeme v oblasti 340nm, kde WDM pracuje, dosáhnout maximálně 18 nosných. V důsledku tohoto se mohou aplikovat jednoduché lasery s poměrně širokým bitrate a jednoduššími multiplexory a de-multiplexory, což se odrazilo na menší spotřebě a projevilo se také nižšími výrobními náklady [3].

## DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex)

Základem je husté vlnové dělení v rozsahu 1270 – 1610 nm, jak je vidět na (viz. obr. 4.4), které dokáže pracovat v minimálním rozestupu kanálů, jako jsou 0,4 až 1,6 nm v libovolné přenosové rychlosti 1 – 40 Gbps. Tato technologie pracuje v oblasti 95nm, tudíž dokáže přenášet až 240 nosných na jednom vlákně. Ty jsou přenášeny paralelně a nezávisle na sobě.

DWDM musí mít pro vytvoření tak jemných odstupů, jako je 0,4 nm a dosahu teoreticky až do 100 km bez nutnosti zesílení signálu, co nejideálnější podmínky, a proto vyžaduje vysoce stabilní vlnovou délku zdroje (tudíž jsou kladeny vysoké nároky na laser) a přesné optické filtry. Na rozdíl od jiných technologií využívá chlazené zdroje pro teplotní stabilizaci, aby se zabránilo krytí vlnových délek. Což všechno spěje k velmi vysoké finanční náročnosti, a proto byla vytvořena podobná technologie, ovšem ne s tak kvalitními materiály jako má DWDM [3].

## UDWDM (Ultra Dense Wavelength Division Multiplex)

Technologie ultra-hustých vlnových délek je nástupcem DWDM. Zde je kladen důraz na ještě jemnější vlnové odstupy mezi jednotlivými kanály a to 0,2 až 0,1 nm. Tyto kanály se budou přenášet po skupinách ORG (Optical Transmission Group). Princip technologie je založen na homodynní detekci, která měří kvantový stav světla a je omezena na dvě ortogonální součástky. Má využití zejména v kombinaci s jinými multiplikovanými technikami, které umožňují zvýšit počet kanálu na dvojnásobek. Tento způsob je stále ve výzkumu. Pilotní režim však bude spuštěn během roku 2014. Jednotlivé odstupy vlnových délek jsou již definovány ITU-T G.694.1.

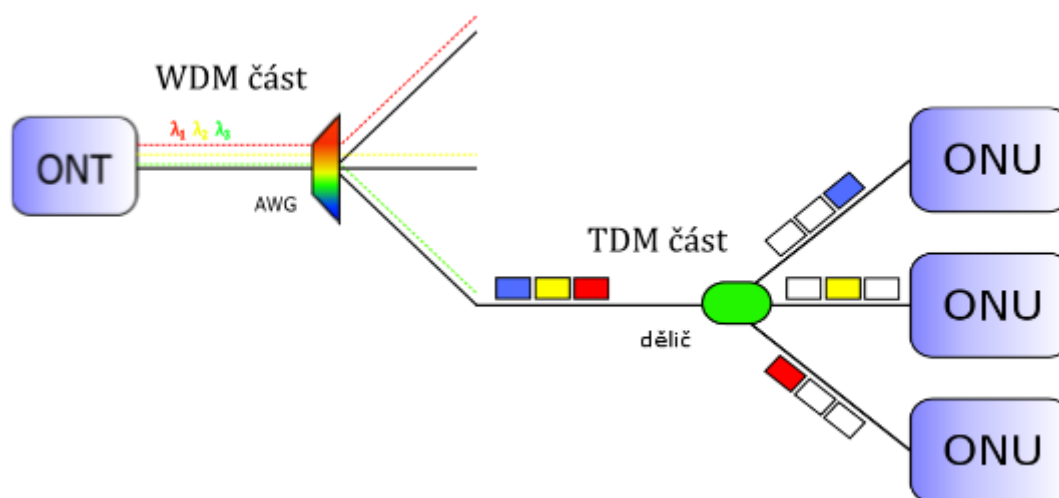
Tabulka.3: Přehled vlnových technologií [9]

	<b>CWDM</b>	<b>DWDM</b>			<b>UDWDM</b>	
Odstup nosných [nm]	20	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1
Frekvence [GHz]	2500	200	100	50	25	12,5
Počet kanálů	18	60	120	240	480	960
Pásmo [nm]	1260 - 1625	1530 - 1625			1530 - 1625	

#### 4.2.2 WDM-TDM-PON

Kombinací jednotlivých metod přenosu vznikla hybridní technologie WDM-TDM, která využívá přednosti těchto multiplexorů. Nevýhodou u časového dělení je nevyužití celé kapacity optického vlákna, což vlnové dělení odstraňuje ovšem za použití větších nákladů. Spojením proto dochází k výtečným přenosovým vlastnostem za přijatelné náklady na realizaci sítě.

Přístupová síť mezi OLT a ONU, jenž tvoří delší část trasy, využívá vlnový multiplex, který vysílá po jednom optickém vlákne všechny vlnové délky současně. Ty jsou následně rozděleny AWG demultiplexorem do jednotlivých podsítí, kde je již využíván časový multiplex. Tento multiplex postupně zasílá data ke konkrétním uživatelům.



Obrázek 4.5: Topologie hybridního WDM/TDM [3]

## 5 Praktické měření parametrů WDM-PON

Praktické měření optické pasivní přístupové sítě bylo realizováno na zařízení platformy Ericsson-Nortel, Release 3. Dané měření jsem uskutečnil na katedře telekomunikací, v laboratoři optických sítí, která disponuje tímto zařízením, jako jediná v České republice.

### 5.1 Popis experimentálního pracoviště

V optické laboratoři jsem využil mnoho nezbytně nutných zařízení pro uskutečnění měření parametrů WDM-PON. Toto zařízení bylo přehledně umístěno v racku a je podrobně popsáno v příloze (viz. DVD příloha č. 24). Další části, mimo rack, jsem využil jako koncové a měřicí zařízení.

#### 5.1.1 Ericsson-Nortel, EAST 1100 Release 3

EAST 1100 (Ethernet Access Service Terminal) představuje v přístupové síti OLT jednotku, která díky modulárnímu systému může pracovat až s 11 sloty. 2 sloty pro síťové rozhraní, které přivádějí konektivitu (NI), 8 slotů pro rozhraní PON (PI) a jeden slot pro řízení (SW).



Obrázek 5.1: OLT jednotka Ericsson-Nortel, EAST 1100 Release 3

Vložená PI (PON Interface) karta podporuje 32 vlnových délek s rychlostí 100 Mbps, které komunikují v C pásmu (upstream) a v L pásmu (downstream). Dále tato karta umožňuje řízení provozu QoS a podporuje mnoho dalších služeb na druhé vrstvě, jako například multicastový protokol IGMP a PIM [14]. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz. tab. 4) [15].

Tabulka.4: Technické parametry PI karty

Katalogový parametr	Hodnota
Rozsah vlnových délek [nm]	1573 - 1600
Minimální průměrný spouštěcí výkon [dBm]	19
Minimální citlivost [dBm]	-29
Odstup kanálů [GHz]	100
Maximální přenosová vzdálenost [Km]	20

## **Přístup na rozhraní**

Pro přístup na grafický řídicí systém jsem použil EMS (Ethernet Access Service Terminal) port, který je na řídicí kartě podle schématu zapojení, jenž je uvedeno v příloze (viz. DVD příloha č. 24). Notebook musí být opatřen požadovaným softwarem a IP adresa musí být ve stejné síti jako OLT jednotka. Z výchozího zobrazení (viz. DVD příloha č. 1) se dostáváme k dalšímu nastavení. Nejprve musíme synchronizovat aktuální konfiguraci, která je uložena na zařízení. V kartě Facility (viz. DVD příloha č. 2) mohu následně aktivovat jednotlivé ONU jednotky.

## **DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol)**

OLT jednotka disponuje DHCP serverem, který využiji k dynamickému přidělování IP adres do všech zařízení v síti. Nejprve musím definovat IP pool (viz. DVD příloha č. 3), ve kterém jsem nastavil síť a počet adres, které bude možno přidělovat. Dále jsem využil rezervaci IP adres (viz. DVD příloha č. 4), kde jsem nastavil pevnou IP adresu pro datový server. Tato adresa bude veřejně známá a uživatelé ji budou využívat pro stahování dat, proto musí být neměnná. V kartě DHCP User (viz. DVD příloha č. 5) je dále pak celkový přehled nad všemi zařízeními, která požádala o přidělení IP adresy. V této kartě je možnost zařízení IP adresu odebrat.

## **IGMP (Internet Group Management Protocol) a PIM (Protocol Independent Multicast)**

Níže uvedené nastavení budu využívat v kapitole č. 7, pro simulaci IPTV v režimu multicast, který nezbytně tyto protokoly využívá.

Aby mohla OLT jednotka přijímat multicastový provoz je nutné mezi ní a zdrojovým zařízením zřídit cestu, po které povede veškerý multicastový provoz. K této realizaci slouží protokol PIM. V kartě PIM jsem proto nastavil adresu routeru Zyxel, který je zdrojem dat pro OLT jednotku a určil jsem rozsah multicastových adres, které mají být zohledňovány.

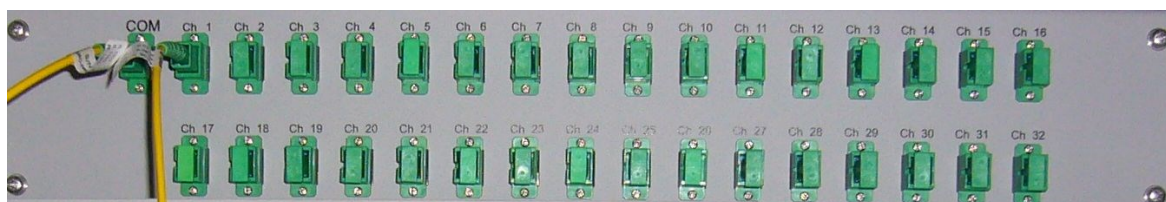
Pro rozdělování multicastového provozu na jednotlivé ONU jednotky, jsem využil IGMP protokolu. V kartě IGMP snooping, (detailní popis nastavení viz. DVD příloha č. 6) je potřeba tuto službu povolit a nastavit speciální multicastovou IP adresu. IP adresu jsem zvolil ze speciálních adres multicastu a to 224.0.0.1, pomocí které se rozešle otázka (query) všem připojeným systémům aby se zjistilo, který klient tento provoz požaduje. Ve zbývajících kartách (viz. DVD příloha č. 7,8,9) jsou přehledy o provozu IPTV.

## **QoS**

OLT jednotka nám dále umožňuje řízení datových toků síťových služeb, které využiji v kapitole č. 9 pro testování změny kvality IPTV. Na kartě QoS Band Limit mohu tyto parametry libovolně měnit v rozmezí 64 – 100000 Mbps. Jestliže budu chtít řídit celou ONU jednotku, využiji karty Port (PI) (viz. DVD příloha č. 10), kde mohu měnit maximální přenosovou kapacitu v downstream nebo upstream směru. V druhém případě kdy budu chtít ovládat samotné porty na ONU jednotce využiji karty Port (ONT).

### 5.1.2 LG-Ericsson WPF 1132c

Pasivní filtr vlnových délek WPF (Wavelength Passive Filter) multiplexuje a demultiplexuje světelné paprsky, přicházející z EAST 1100 (OLT) do portu COM. Rozdělování do jednotlivých portů probíhá na základě vlnovodů, uspořádaných do mřížky, které odráží jednotlivé vlnové délky paprsku bez nutnosti elektrické energie [15].



Obrázek 5.2: LG-Ericsson WPF 1132c

Tabulka.5: Technické parametry WPF

Katalogový parametr	Hodnota
Vložný útlum [dB]	5
Celkový počet portů [-]	32

### 5.1.3 Dělič

Tento pasivní optický prvek (viz. DVD příloha č. 11) rozděluje pomocí vláknové odbočnice optický výkon, dle dělicího poměru do více optických vláken. Typicky z jednoho vstupu na dva výstupy. Poměr odbočení je možné zvolit podle potřeby, v mém případě jsem využil dělicího poměru 90:10.

### 5.1.4 LG-Ericsson EARU 1112

Koncové zařízení ONU (viz. DVD příloha č. 12) je umístěno na straně účastníka. Toto zařízení převádí optický signál na elektrický do Ethernet 100Base-TX portů. Je univerzální pro všechny vlnové délky v C a L pásmu. Tato problematika je popsána v kapitole č. 5 [14]. Technické parametry jsou uvedeny v tabulce (viz. tab. 6) [15].

Tabulka.6: Technické parametry EARU 1112

Katalogový parametr	Hodnota
Spotřeba energie [W]	<10
Minimální průměrný spouštěcí výkon [dBm]	-12
Minimální citlivost [dBm]	-36
Rozsah vlnových délek [nm]	1533 - 1560

### 5.1.5 Optická vlákna

V optické části trasy jsem použil jednovířová vlákna s útlumem 0,2 dB/km s SC (Single Contact) konektory, které jsou kompatibilní s technologiemi 100Base-FX. V přístupové síti jsou prvky propojeny SC konektory s APC (Angled Physical Contact) úhlově broušenou ferulí, která zpětné odrazy směřuje mimo optické vlákno. Ve zbytku trasy je použit SC konektor s NPC (Non Physical Contact) klasicky rovně zabroušenou ferulí.



Obrázek 5.3: SC konektor s APC ferulí (nalevo), SC konektor s NPC ferulí (napravo)

### 5.1.6 Simulátor vedení FVA-60B

Tato optická komponenta (viz. DVD příloha č. 13) za pomoci dvou posuvných ferulí, které se od sebe oddalují a tím zvyšují vložný útlum, který simuluje délku trasy na dvou vlnových délkách 1310 a 1550 nm. Pro přepočet útlumu na délku trasy podle vzorce 5.1 je použito vlákno ITU-T G. 652 D s měrným útlumem 0,28 dB/km. Před každým měřením bylo nutné provést kalibraci motorku, který oddaluje ferule, jinak by bylo měření značně nepřesné.

$$l = \frac{\alpha(\lambda)[dB]}{\alpha(\lambda)[dB/km]} [km] \quad (5.1)$$

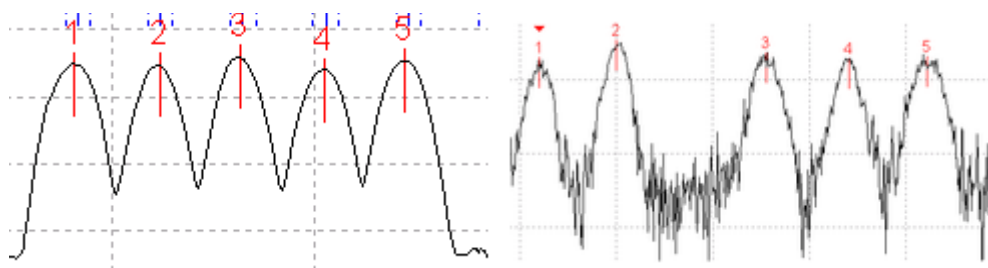
## 5.2 Popis měřících přístrojů

Pro měření byly využity přístroje od společnosti EXFO, kterými disponuje katedra telekomunikací a jsou tudíž volně přístupné k použití a testování.

### 5.2.1 EXFO FTB-400

Jedná se o verzi multimodulárního systému (viz. DVD příloha č. 14), který je snadný na správu dat a programů. Platforma využívá Windows XP a disponuje USB (Universal Serial Bus) portem pro snadné exportování výsledků měření ve formátu pdf. Platforma je doplněna o modul FTB 5240B (viz. DVD příloha č. 15) optický spektrální analyzátor, který pracuje v rozmezí 1250 až 1650 nm. Rychlá a přesná diagnostika a kontrola DWDM/CWDM sítí. Automatické kanálové vyhledávání pro jednoduché nastavení a měření [16].

Nastavení měřicího přístroje je uvedeno v příloze (viz. DVD příloha č. 23). Měřicí rozsah jsem nastavil na C+L pásmo, 10 měřicích cyklů a rozsah výkonu -26/-75 dBm, při nižším rozsahu obsahovaly vykreslené kanály šum (viz. obr. 5.4).



Obrázek 5.4: Spektrální analýza s rozsahem výkonu -26/-75 dBm (nalevo), Spektrální analýza s rozsahem výkonu -15/-64 dBm (napravo)

### 5.3 Výsledky měření

Měření bylo provedeno s výše dostupnými přístroji a jeho cílem bylo měření základních parametrů v optické přístupové síti. Na základě toho byly provedeny následující testy:

- Měření útlumů.
- Měření optickým spektrálním analyzátozem.

#### 5.3.1 Měření útlumů

Měření jsem provedl metodou 1C, pomocí které je změřena kompletní trasa včetně konektorů. V první části jsem provedl měření na všech 32 portech AWG, na vlnové délce 1550 nm. Cílem bylo najít kanál s nejnižším útlumem pro pozdější měření se simulovaným vedením, které pracuje na této vlnové délce. Výsledky, které jsou uvedené v tabulce (viz. tab. 7), vykazují jednoznačně nejnižší útlum 3,52 dB na 22. portu.

Tabulka.7: Útlumy na portech AWG

Port	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Útlum [dB]	48	53	46	75	50	47	53	41	72	44	71	51	69	68	59	47
Port	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Útlum [dB]	36	55	48	6	49	3,5	10	63	16	37	8,9	44	66	17	51	72

Druhá část byla zaměřena na testování maximálního dosahu OLT jednotky. Pro tuto simulaci bylo do 22. portu připojeno simulované vedení, kde jsem po skocích 0,05 dB zvyšoval vložný útlum, a to až na kritickou hranici 20,55 dB kdy došlo k odpojení ONU jednotky a nebylo možno s touto jednotkou nadále komunikovat. Maximální garantovaná vzdálenost udávaná výrobcem je 20km. Dle přepočtu, pomocí vzorce 5.1, dosahuje výkon OLT jednotky až vzdálenosti 73,39 km. Z čeho vyplývá, že od 20 do 73,39 km se budou zhoršovat parametry sítě, až do doby kdy se jednotka úplně odpojí.



### 5.3.2 Měření optickým spektrálním analyzátozem

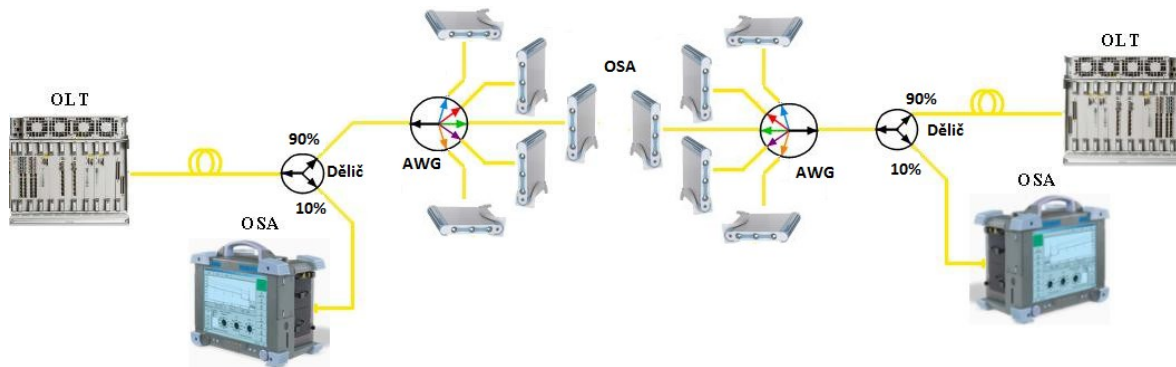
K uskutečnění měření jsem využil spektrální analyzátor EXFO FTB-5240B, popsáný v kapitole č. 5. Před tento analyzátor bylo nezbytné zařadit vlnový dělič s poměrem 90:10, kde k 10 % byl připojen OSA (Optical Spektral Analyzer) aby nedošlo k destrukci měřicího přístroje vlivem velké energie z OLT jednotky. Pokles výkonu jsem následně přepočítal na základě vzorců 5.2 a 5.3 zpět na 100%, aby nedošlo ke zkreslení výsledků.

Pro správný přepočet je důležité změřený výkon uvedený v dBm, převést na výkon uvedený mW. Jednotka dBm (decibel nad miliwattem) je výkon v poměru k výkonu 1mW.

$$P_{mW} = 10^{\frac{P_{dBm}}{10}} \quad (5.2)$$

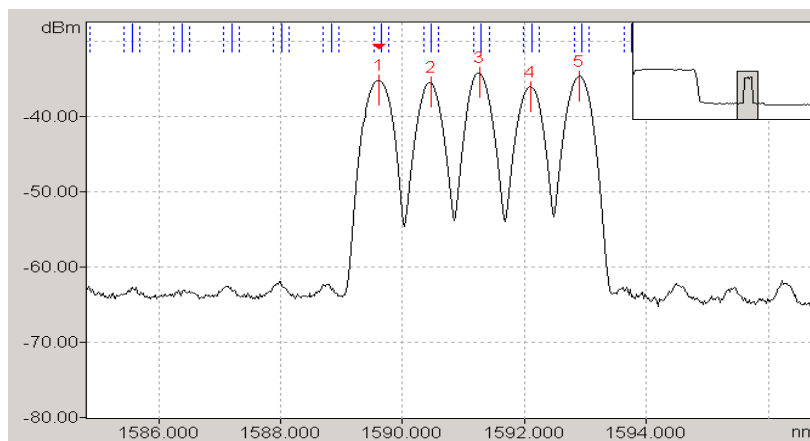
$$P_{dBm} = 10 \log_{10} P_{mW} \quad (5.3)$$

Vzhledem k daným možnostem, které jsou dány počtem pěti ONU jednotek v laboratoři, bude proměřeno pouze 5 kanálů. Podle standardizace ITU-T by měl vlnové délce 1550 nm nejlépe vyhovovat port 22, což jsem potvrdil v předchozím měření, a proto se v následujícím měření budu věnovat portu v rozsahu 20 – 25.



Obrázek 5.5: Blokové schéma pro měření spektra, downstream (nalevo), upstream (napravo)

Oblast měření probíhala před AWG, kde v C pásmu, vyhrazeném pro downstream, je vidět shluk všech vlnových délek, které vysílá jednotka OLT (viz. obr. 5.6). V pásmu L, které je určeno pro upstream, jsou vidět už jen ty vlnové délky, na kterých komunikují aktivní ONU jednotky.



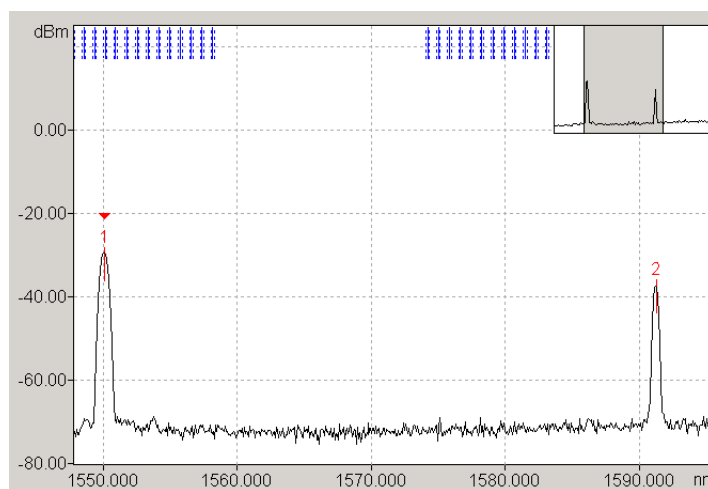
Obrázek 5.6: Spektrum optického vlákna mezi OLT a AWG

Výsledky ze spektrometru bylo možné exportovat do formátu pdf, kde je možno vyčíst vlnovou délku kanálu, která je vlivem teploty mírně posunutá od specifikované vlnové délky ITU-T. Dále výkony kanálu, které splňují doporučení -30 až 10 dBm a SNR (Signal to Noise Ratio), který vyjadřuje odstup signálu od šumu a měl by se pohybovat v rozmezí 0 až 55 dB, což všechny kanály taktéž splňují. Všechny výsledné parametry jsou uvedeny v tabulce (viz. tab. 8).

Tabulka.8: Parametry signálu mezi OLT a AWG

Kanál	Vlnová délka [nm]		Pásmo [-]	SNR [dB]	Šum [dBm]	Výkon [dBm]
	Změřené	ITU-T				
20	1589,621	1589,653	L	25,26	-44,92	-21,65
21	1590,465	1590,474	L	23,61	-44,3	-21,9
22	1591,269	1591,296	L	24,59	-44	-20,8
23	1592,108	1592,118	L	22,75	-43,8	-22,51
24	1592,911	1592,942	L	27,88	-47,43	-21,18

V oblasti měření za AWG jsem odchytával v obou směrech, tedy v pásmu C a L, pouze jednu odfiltrovanou vlnovou délku daného kanálu z demultiplexoru AWG.



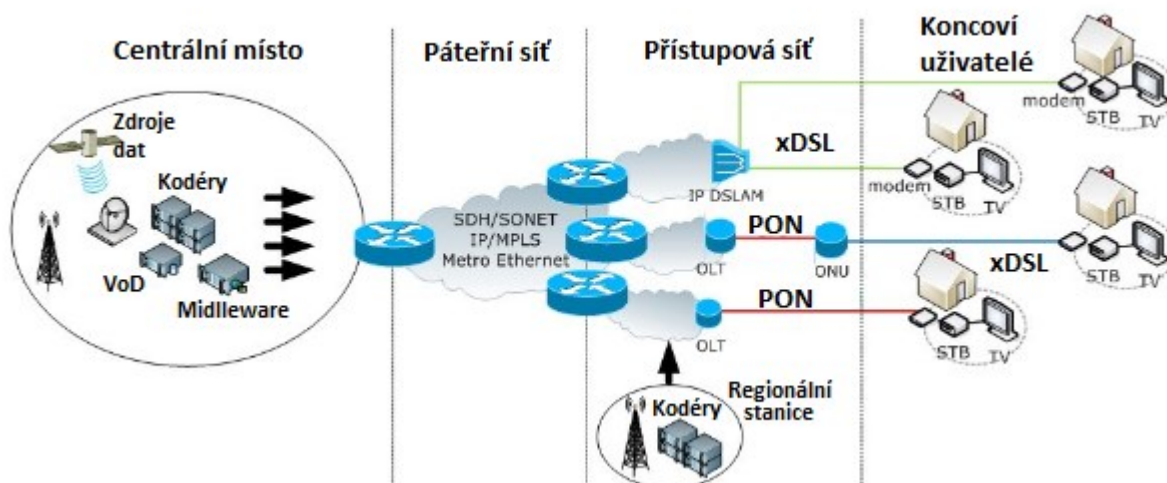
Obrázek 5.7: Spektrum optického vlákna mezi AWG a ONU

Tabulka.9: Parametry signálu mezi AWG a ONU

Kanál	Vlnová délka [nm]		Pásmo [-]	SNR [dB]	Šum [dBm]	Výkon [dBm]
	Změřené	ITU-T				
22	1550,083	1550,116	C	16,8	-30,37	-14,91
22	1591,257	1591,296	L	34,05	-57,24	-24,24

## 6 Distribuce IPTV

IPTV představuje přechod z analogové distribuce na digitální. Poskytuje televizní služby v reálném čase založené na IP protokolu, kde se uživatelé nabízejí možnost výběru mezi několika datovými proudy (streamy). Dnes je IPTV systém považován za jednu z klíčových služeb sítě nové generace – NGN (Next Generation Network). Uspořádání sítě IPTV je uvedeno na obrázku (viz. obr. 6.1). Data, která se postupně ukládají na serverech ve výchozím pracovišti (head-end), jsou dále zpracovávána do datových proudů. V případě zpracování z analogového zdroje jsou kódovány do příslušného kodeku a přes páteřní síť distribuovány do regionálního zpracování. V regionálním centru je možnost přidání lokálního vysílání a přes přístupovou síť distribuováno koncovým uživatelům [17].



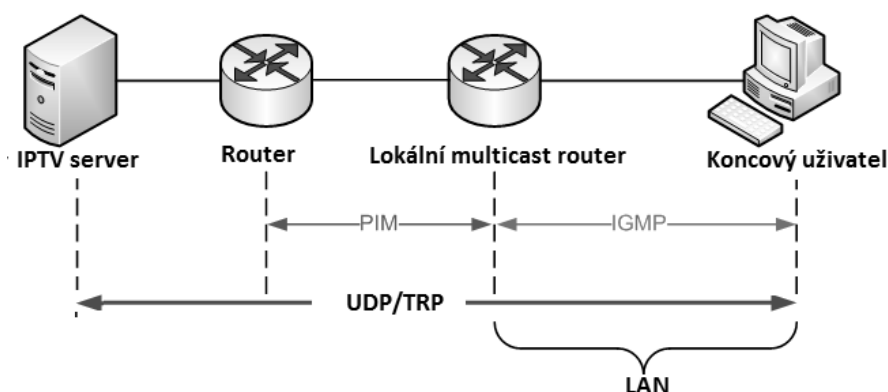
Obrázek 6.1: Uspořádání sítě IPTV

### Videosignál přenášený v IPTV je definován:

- Kódováním obrazu - MPEG-2 nebo MPEG-4.
- Obrazovým formátem - SDTV (Standard Definition TeleVision), které má 576 řádků a HDTV (High Definition TeleVision), které má 720 nebo 1080 řádků.
- Kompresí obrazu - video obraz se skládá z mnoha snímků (Frames), kde počet přenesených snímků za sekundu (fps) musí být minimálně 50, aby se pohyb jevil plynulý a neblíkal. Obraz může být vykreslován prokládaně (interlace) za účelem snížení šířky pásma nebo progresivně (progressive). Prokládání spočívá v tom, že v jednom okamžiku se nepřenáší celý obraz, ale pouze jeho liché řádky. V dalším okamžiku pouze sudé, tím se dosáhne k přenesení potřebných 50 snímků z originálních 25. Zvýšení kvality videa dosáhneme progresivním prokládáním, kde je vykresleno 25 kompletních snímků za sekundu [18].

## 6.1 Používané protokoly pro IPTV

IGMP (Internet Group Management Protocol) pracuje mezi koncovým uživatelem a místním multicastovým routerem. Protokol PIM (Protocol Independent Multicast) se používá mezi lokálním a vzdáleným routerem pro přímé a vícesměrové vysílání z IPTV serveru. Veškerá komunikace probíhá na transportní vrstvě nad UDP (User Datagram Protocol) nebo RTP (Real time Transport Protocol) protokolem. Pro lepší představu můžeme tuto základní strukturu vidět na obrázku (viz. obr. 6.2).



Obrázek 6.2: Základní struktura pro multicast služby

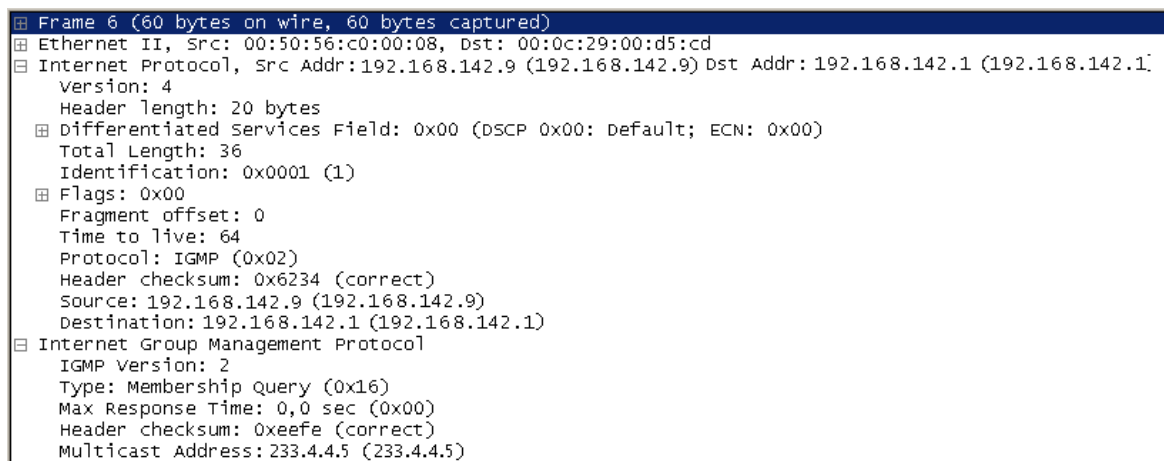
### 6.1.1 IGMP

IGMP protokol umožňuje více směrového vysílání IP v sítích TCP/IP. Je definováno jako standard TCP/IP ve specifikaci RFC (Request For Comments). Využívá se pro dynamické přihlašování a odhlašování z multicastové skupiny, kterou zaštiťuje router ve své lokální síti. IGMP protokol řeší i situaci, kdy jsou v síti připojeny dva a více multicastových routerů, v takovéto topologii by pak mohlo docházet k šíření nadbytečných informací. IGMP protokoly rozlišujeme podle verze:

- IGMPv2 – definované jako RFC 2236, základní verze používaná pro podporu IPTV.
- IGMPv3 – definované jako RFC 3376, vylepšení o podporu SSM (Single Source Multicast), jedná se o filtrování podle zdroje, je založeno na myšlence, že stanice, která je členem skupiny, může mít zájem o příjem dat, ale jen od některých členů této skupiny.

Pro přihlášení stanice do skupiny musí zaslat přes protokol IGMP zprávu Membership report (viz. obr. 6.3) s IP adresou skupiny třídy D a hodnotou TTL (Time To Live) = 1. Tento způsob užíváme, aby zprávu slyšely pouze ty směrovače, které jsou v lokálním segmentu a nepředávaly ji dál. Jakmile zpráva dorazí k lokálnímu multicast routeru, ten si ji zapíše do tabulky a začne tímto směrem vysílat datový tok.

K odhlášení ze skupiny použije stanice typ zprávy Leave group, pokud v tabulce neexistuje žádná stanice, která by chtěla z této adresy informace odebírat, router záznam z tabulky zruší. Zároveň však router zasílá periodický dotaz General query ke stanicím v lokální síti pomocí IP 224.0.0.1 s TTL = 1, pokud se zde nachází alespoň jedna stanice, která chce ze skupiny informace odebírat. Jestliže mu žádná do 10 sekund neodpoví, vymaže z tabulky záznam o skupině. Tento dotaz řeší problém, kdy se stanice před vypnutím nestihne z odběru skupiny odhlásit [19].



```
Frame 6 (60 bytes on wire, 60 bytes captured)
Ethernet II, Src: 00:50:56:c0:00:08, Dst: 00:0c:29:00:d5:cd
Internet Protocol, Src Addr: 192.168.142.9 (192.168.142.9) Dst Addr: 192.168.142.1 (192.168.142.1)
Version: 4
Header length: 20 bytes
Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP 0x00: Default; ECN: 0x00)
Total Length: 36
Identification: 0x0001 (1)
Flags: 0x00
Fragment offset: 0
Time to live: 64
Protocol: IGMP (0x02)
Header checksum: 0x6234 (correct)
Source: 192.168.142.9 (192.168.142.9)
Destination: 192.168.142.1 (192.168.142.1)
Internet Group Management Protocol
IGMP Version: 2
Type: Membership Query (0x16)
Max Response Time: 0,0 sec (0x00)
Header checksum: 0xeefe (correct)
Multicast Address: 233.4.4.5 (233.4.4.5)
```

Obrázek 6.3: Odposlech zprávy typu Membership Report, programem Wireshark

IGMP snooping je optimalizační mechanismus pro L2 switche. Zajišťuje zkoumání multicast provozu a detekci join a leave zpráv. Podle toho můžeme určit, na kterém portu se nachází router, kde klienti. IGMP snooping sestavuje tabulku, podle které přeposílá multicast, ovšem pouze na ty porty, kde klient tento provoz vyžaduje. Také odpovědi klientů odesílá pouze na router a ne ostatním klientům. Dynamicky tedy konfiguruje porty pro příjem multicastu.

### 6.1.2 PIM

Protokol PIM (Protocol Independent Multicast) zajišťuje optimální tok paketů multicastového přenosu mezi routery, ty s jeho pomocí vytvářejí strom nejkratších cest, od momentálních zdrojů vysílání k příjemcům. Jeho vytváření může probíhat dvěma navzájem protichůdnými metodami:

- Hustý režim DM (Dense Mode) - provoz je proto implicitně směrován do všech segmentů. Jestliže některý směrovač, na základě protokolu IGMP zjistí, že na svých rozhraních nemá žádného zájemce o příjem dané skupiny, pošle na vyšší úroveň distribučního stromu zprávu PRUNE („prořezávání stromu“). Na jejím základě přestane nadřazený směrovač do dané větve šířit provoz multicastové skupiny. Jestliže se v průběhu času objeví nějaký zájemce o příjem, lokální směrovač se opětovně přihlásí k odběru provozu nebo vyčká, dokud nevyprší platnost zprávy PRUNE a multicastový provoz se začne větví opět šířit.
- Řídký režim SM (Sparse Mode) - multicastový provoz se implicitně nešíří nikam, což zabraňuje zbytečnému zahlcování celé sítě multicastovým provozem. Směrovače v případě zjištění výskytu posluchače multicastové skupiny vyšlou ke kořeni stromu žádost o připojení JOIN a větví se tak začne šířit multicastový provoz [20].

## 6.2 Používané kodeky pro IPTV

Kodek obecně znamená systém pro kódování a dekódování digitálního signálu. Kodeky se dělí na bezztrátové, kde komprese umožňuje zachovat plnou kvalitu videa. Avšak pro IPTV se nejčastěji používá ztrátová komprese, kde dochází k částečnému zhoršení kvality, aby se dosáhlo co nejmenšího objemu dat pro následný přenos. Standarty ztrátové komprese jsou MPEG-2/H.262 a MPEG-4/H.264

### 6.2.1 MPEG-2/H.262

MPEG-2 je jedním z nejpoužívanějších kompresních standardů. Byl schválen v roce 1994 a je postaven na MPEG-1. Výhodou standardu MPEG-2 je, že je vhodný pro kódování progresivního i prokládaného videa. Používá se k šíření digitálního televizního signálu, jako jsou DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial), DVB-S (Digital Video Broadcasting - Satellite) a DVB-C (Digital Video Broadcasting - Cable). Definuje syntaxi toku bitů a vlastnosti přijímače. MPEG-2 obsahuje různorodé profily a úrovně. Kombinací odlišných parametrů, jako je rozlišení, znamenající počet řádků a pixelů, vzorkovací frekvence, počet snímků za sekundu a další [21].

### 6.2.2 MPEG-4/H.264

Nejnovější, dnes nejpoužívanější kompresní standard určený pro široké škály aplikací, v rozmezí od mobilního videa na HDTV. Dosahuje vysoké komprese až o 30% větší než u MPEG-2, za pomoci vyšší hardwarové náročnosti. Z tohoto důvodu ji nelze použít na starším zařízení, i přesto je široce využívána. Obsahuje řadu nových funkcí, které umožňují účinněji kompresovat video než u starších norem s větší flexibilitou pro aplikace [21].

## 7 Streamování videa

### 7.1 Způsob streamování

Způsobů šíření multimediálních dat je několik. Mezi základní způsob se řadí všesměrové vysílání, což je souběžné vysílání ke všem potenciaálním příjemcům, bez ohledu na to zda, video chtějí přijímat nebo ne. Kapacita linky se tímto způsobem vytěžuje na maximum a je proto velice nevhodná pro způsob IPTV vysílání. Tuto situaci řeší dvě následující metody.

#### 7.1.1 Unicast

Unicast je přímá komunikace mezi serverem a příjemcem, který požádal o příjem videa. Pokud je použita komunikace tohoto typu musí zdroj, tedy IPTV server, vyslat data tolikrát, kolik je příjemců. Při větším počtu příjemců může dojít k zahlcení sítě velkým množstvím požadavků. Takto přijímané video může příjemce kdykoliv pozastavit, aniž by se muselo v pozadí nahrávat na pevný disk, pro pozdější znovu spuštění.

#### 7.1.2 Multicast

Nejpoužívanější metodou je multicast. Video je zde šířeno v reálném čase. Klíčovým cílem této technologie je zásadní odlehčení zátěže vysílajícího uzlu a přenosové soustavy, při přenosech typu jeden zdroj - mnoho příjemců.

Zdroj tedy vysílá data, určená neznámému, potenciálně velmi velkému počtu příjemců (skupině), pouze jednou a veškerá režie spojená s distribucí příjemcům je ponechána na lokálním multicastovém routeru, který videa duplikuje. Na nich také je, aby zajistily efektivní přenos dat od zdroje k příjemcům, tedy aby vysílaná data poslaly po každém spoji nejvýše jedenkrát, a to pouze tehdy, je-li daným směrem skutečně nějaký příjemce. Na rozdíl od klasického přímého vysílání (unicast), kdy přenos paketu dat od zdroje k cíli je iniciován zdrojem, je tok paketů skupinového vysílání určován příjemci. K identifikaci skupin příjemců se používá speciální třída adres IP (třída D), zahrnující adresy z množiny 224.0.0.0 až 239.255.255.255. Vysílající uzel odesílá pakety dat s cílovou adresou skupiny (a svou vlastní obyčejnou zdrojovou adresou) [22].

#### **Rozdělení IPTV do multicastových skupin:**

- Podle multicastové adresy – každé video má svoji vlastní multicastovou adresu a vlastní port, na kterém vysílá a v případě zažádání odběru tohoto videa, příjemce odebírá pouze dané video.
- Podle portu – v tomto případě je skupina videí (multiplex) posílána na jedné multicastové adrese a jednotlivé videa jsou odlišena portem. Příjemce tohoto multiplexu přijme takto několik videí současně a má možnost jedno video sledovat a druhé nahrávat. Tento způsob ovšem mnohonásobně více zatěžuje přístupovou síť.

**Multicastové IP adresy:**

- 224.0.0.0 až 224.0.0.255 - určené pro síťové protokoly uvnitř LAN (Local Area Network).
- 224.0.1.0 až 238.255.255.255 - jsou globální multicast adresy.
- 239.0.0.0 až 239.255.255.255 - je omezený rozsah adres, použití uvnitř organizace (LAN).
- 224.0.0.1 - všechny systémy.
- 224.0.0.2 - všechny lokální (na stejném subnetu) routery.
- 224.0.0.252 – LLMNR (Link Local Multicast Name Resolution) je protokol založený na DNS (Domain Name System), pro IP host provádí překlad názvů hostitelů na stejné místní spojení.

## 7.2 Vytvoření a příjem streamu

Vlastní tvorbu streamu jsem simuloval na serveru, na kterém jsem vytvořil virtuální stroj s požadovaným freeware softwarem, který je volně ke stažení na internetu. Operační systém Linux, s distribucí Ubuntu 12.10, jsem zvolil na základě rychlejšího nabíhání a běhu systému. Další výhodou tohoto systému jsou širší možnosti nastavení v programu VLC, který je pro verzi Linux bohatší než pro jiné operační systémy.

### 7.2.1 Server Abacuc

Server, na který jsem nasazoval IPTV je od firmy Abacus typu 1U. Tento typ disponuje čtyřmi síťovými kartami s maximální rychlostí 100 Mbps, full duplex. Součástí konfigurace jsou 4 pevné disky, což je podmínkou virtualizace, přičemž je nezbytné použití minimálně dvou pevných disků (na jednom je systém a na druhém virtuální stroje a další data). Jako operační systém byl použit VMware, který pracuje na bázi Linuxu a slouží jako virtualizační nástroj pro servery. K tomuto operačnímu systému bylo možno přistupovat přes veřejnou adresu a program VMware Client, který je součástí balíčku VMware [23].

Pomocí programu VMware jsem server rozdělil na dva virtuální stroje a každému přiřadil jednu síťovou kartu pro připojení k síti. V konfiguraci bylo nezbytné nastavení jednotlivých portů síťových karet na rychlost 100 Mbps, full duplex. Při nastavení automatické detekce docházelo ke kolísání a rychlost nedosahovala svého maxima.



Obrázek 7.1: Server Abacuc



### 7.2.2 Virtuální stroj

Na serveru jsem vytvořil virtuální stroj pro DATA a IPTV, na obou z nich byl instalován operační systém Linux, jehož výhody jsem uvedl v předchozím bodu. Tyto virtuální stroje byly napojeny do lokální sítě pomocí UTP (Unshielded Twisted Pair) kabelu CAT 5E. Přidělování IP adresy probíhalo pomocí protokolu DHCP.

#### Virtuální stroj DATA

Tento virtuální stroj byl zřízen pro simulaci přenosu dat v síti, která byla v pozdějším měření paralelně přenášena s IPTV provozem a fungovala jako zátěž sítě.

Aby bylo pro koncového uživatele možné tato data bezproblémově stahovat, musel být na tomto virtuálním stroji vytvořen webový server. Pro tuto situaci jsem nainstaloval Apache HTTP (HyperText Transfer Protocol) server s podporou PHP (Hypertext Preprocessor). Samotnou webovou stránku, na kterou budou uživatelé přistupovat, jsem vytvořil v http a php kódu. Webová stránka je rozdělena na sekci download, kde si uživatelé budou data stahovat, dále sekci upload, kde je možné data nahrávat a v poslední sekci je možné nahraná data prohlížet. Náhled a zdrojový soubor je uveden v příloze (viz. DVD příloha č. 25,26).

#### Virtuální stroj IPTV

IPTV je virtuální stroj, který bude klíčovým zdrojem IPTV provozu. Pro realizaci bylo nutné provést několik následujících změn v systému.

**fw\_services\_ext\_ip="igmp"** – povolení protokolu IGMP v zabezpečení firewall.

**fw\_services\_ext\_udp="[číslo portu]"** – povolení portu v zabezpečení firewall.

**config\_ip\_router=y** – přidání směrování IP do systémového jádra.

**config\_ip\_multicast=y** – přidání podpory multicast do systémového jádra.

**ip route add to 224.0.0.0/4 dev eth0** – doplnění směrovací tabulky multicastovým rozsahem.

Jako softwarové řešení pro stream a příjem videa jsem použil hlavní produkt od projektu VideoLan VLC media player. Multimediální přehrávač VLC nabízí komplexní podporu pro video soubory všech typů: MPEG-1, MPEG-2, MPEG-4, WMV, ASF, AVI, VideoCD, DVD, digitální satelitní kanály, digitální televizní kanály a živé video z internetu v unicast / multicast režimu v rámci širokopásmové sítě IPv4 nebo IPv6. Plně podporuje všechny důležité audio formáty - AAC, AC3 (A52), ADPCM, DTS, DV Audio, FLAC, MPEG Layer 1 / 2, Vorbis, WMA 1 / 2 a MP3 [25].

Abych mohl streamovat několik videí současně, bylo zapotřebí využít správce vysílání VLM (VideoLAN Manager), který je součástí přehrávače VLC. Následující příkazy jsem uložil do souboru typu conf, který je spustitelný pomocí programu VLM. Kompletní zdrojový soubor je uveden v příloze (viz. DVD příloha č. 27,28).

#### **new video broadcast enabled**

– povolení instance s příkazem new, který vytváří nové elementy následujícího typu:

- broadcast – zdroj, který vysíláme podobně jako televizní či rozhlasové vysílání; pouze administrátor může vysílání spouštět a zastavovat.
- vod – video na přání, tj. administrátor definuje nabídku zdrojů a klient si pak sám spouští vysílání.
- schedule – pomocný element, který umožňuje spouštět a zastavovat zdroje definované jako broadcast podle zadaného časového rozvrhu.

#### **setup video input v1.avi**

- definice vstupního zdroje, který se má vysílat.

#### **setup video output #std{access=udp,mux=ts,dst=233.4.4.5}**

- síťové vysílání, kde je definována IP adresa, protokol L4 a kodek. Pokud neuvedeme port, bude automaticky nastaven na hodnotu, v oblasti registrovaných portů, 1234.

#### **setup video output #std{access=udp,mux=ts,dst=233.4.4.5:1224}**

- síťové vysílání, kde je definován socket, protokol L4 a kodek.

#### **control video play**

- parametr play, spouští definovaný zdroj.

#### **vlc --vlm-conf="iptv.conf"**

– spuštění konfiguračního souboru iptv.conf v terminálu ubuntu.

### **7.2.3 Router ZyXEL XGS-4528F**

Jelikož je nutný převod metalického vedení na optické, musel jsem do topologie zařadit router s duálními porty. Pro tyto účely jsem využil Ethernetový router (viz. DVD příloha č. 16) pro více vrstev (L2/L3/L4) s podporou čtyř rychlostí připojení 10/100/1000 Mbps a 10 Gbps. Obsahuje 20 portů 1000BaseT, 4 Gigabitové duální porty a 1 open slot pro doplňkový 10-Gigabitový uplinkový modul [26].

Jako zdroj optického signálu byl použitý SFP (Small form Factor Pluggable) modul Forara FS3124L2D (viz. DVD příloha č. 17). Maximální přenosová rychlost modulu je 1,25 Gbps s dosahem až 20Km určený pro vlnovou délku 1310nm (LX rozhraní) [27].

Na grafické rozhraní jsem přistupoval přes ethernetový port na adrese 192.168.1.1, ve kterém je rozšířená možnost konfigurace. Nejdříve bylo nutné sjednotit nastavení rychlosti portů, aby odpovídaly stejnému nastavení, jako je na síťových kartách u virtuálních strojů. Dále byla nutná aktivace IGMP protokolu (viz. DVD příloha č. 18), který je nezbytný na korektní funkci multicastu.

#### 7.2.4 Koncové zařízení – notebook Acer

Jako koncové zařízení byl použit notebook Acer Aspire One ZG5, s nejrozšířenějším operačním systémem běžných uživatelů Microsoft Windows 7 s multimediálním přehrávačem VLC, tentokrát s platformou pro Windows.

Pro snadnější přístup k programům IPTV je uživateli k dispozici playlist se všemi multicastovými skupinami, mezi nimiž si uživatel jednoduše přepíná (viz. DVD příloha č. 19). Playlist je soubor typu vlc, který je spustitelný pomocí programu VLC a obsahuje následující kód.

**#EXTM3U** – vytvoření souboru typu m3u, tento formát je určen k ukládání multimediálních skladeb.

**#EXTINF:0,video1 (sheep)** – pojmenování multicastové skupiny.

**udp://@233.4.4.5** – nastavení multicastové IP adresy pro příjem výše uvedené skupiny.

Pro přístup na datový server jsem využil webový prohlížeč Mozilla Firefox, pomocí kterého jsem na privátní IP adrese 192.168.142.4 přistupoval k datovému uložišti.

## 8 Hodnocení kvality

### 8.1 Kvalita služeb QoS

Přenášený video tok vyžaduje co nejmenší hodnoty u parametrů jako je kolísání, zpoždění, ztrátovost paketů. Podle hodnot těchto parametrů se odvíjí výkonnostní třída služby (viz. tab. 10). Pokud dojde ke zhoršení (zvýšení hodnoty) jakéhokoliv parametru nastává i zhoršení kvality služby u koncového uživatele.

Tento problém řeší kvalita služby (QoS – Quality of Service), což je soubor postupů, který zajišťuje uživateli co nejlepší kvalitu dané služby. Zajišťuje přidělení dostatečných prostředků používané sítě tak, aby umožňovaly poskytnout danou službu v kvalitě garantované poskytovatelem. Přenosové prostředky sítě, které jsou využívány mnoha aplikacemi a uživateli, jsou přerozděleny tak, aby umožnily fungování každé službě s předem zaručenými vlastnostmi sítě [28].

#### 8.1.1 Celkové zpoždění (latency)

Je čas, který uplyne od odeslání zprávy zdrojovým uzlem, po její přijetí na uzlu cílovém. Zahrnuje zpoždění v přenosové trase a na zařízeních, které jsou její součástí.

- Vliv na video: Krátkodobá prázdná místa, ztráta signálu.
- Vliv na zvuk: Mezery ve spojení, prodleva.

#### 8.1.2 Změna pořadí paketů (packet order)

Je přímým důsledkem existence zpoždění i principem individuálního směřování každého paketu.

#### 8.1.3 Kolísání zpoždění (jitter)

Představuje variabilitu v doručování paketů cílovému uzlu (tedy ve zpoždění při přenosu). Způsobuje přetečení nebo podtečení vyrovnávací paměti v set-top boxu.

- Vliv na video: Výpadky, změna jasu, krátkodobá prázdná místa, poskakování obrazu.
- Vliv na zvuk: Zkreslený hlas, šum, praskání.

#### 8.1.4 Ztrátovost paketů (packet loss)

Je průměrný počet ztracených paketů za určité období vyjádřený v procentech, vzhledem k celkovému počtu přenesených paketů.

- Vliv na video: Zrnění, výpadky, krátkodobá prázdná místa, ztráta signálu.
- Vliv na zvuk: Zkreslený hlas, šum, praskání, ztráta spojení.

#### 8.1.5 Propustnost (bandwidth)

Udává kapacitu přenosového kanálu, je tedy výchozím parametrem pro nabídku poskytovaných služeb. Kapacita kanálu C vyjadřuje maximální množství informací přenesených za jednotku času.

### 8.1.6 Zpoždění (delay)

Je zpoždění proměnné velikosti a vzniká naplněním paketů do fronty na odchozí interface.

Tabulka.10: Základní provozní vlastnosti podle třídy služeb (Metro ethernet)

Třída služby	Charakteristika služby	CoS ID	Základní provozní vlastnosti
Premium	IP telefonie v reálném čase nebo IP video aplikace	6, 7	Delay < 5ms Jitter < 1ms Loss < 0.001%
Silver	Přenos důležitých datových souborů s kolísavým zatížením, vyžadující nízké ztráty a malé zpoždění	4, 5	Delay < 5ms Jitter = N/S (není specif.) Loss < 0.01%
Bronze	Přenos dat s kolísavým profilem zátěže a potřebou zaručit jistou šířku pásma	3, 4	Delay < 15ms Jitter = N/S (není specif.) Loss < 0.1%
Standard	Best effort service	0, 1, 2	Delay < 30ms Jitter = N/S (není specif.) Loss < 0.5%

## 8.2 Objektivní metoda k hodnocení kvality obrazu a videosignálu

Tato metoda používá k určení kvality obrazu a videosignálu matematické výpočty. Objektivní metoda je rychlejší a levnější oproti subjektivní metodě. Kvalita videosignálu se testuje na základě obrazových snímků s komprimovanou verzí a degradovanou kvalitou signálu. Mezi objektivní měření kvality se řadí MSE, PSNR (Paek Signal to Nois Ratio), MDI (Media Delivery Index), MPQM (Moving Pictures Quality Metric), SSIM a další. Pro mé účely použiji metodu MSE s SSIM.

### 8.2.1 MSE

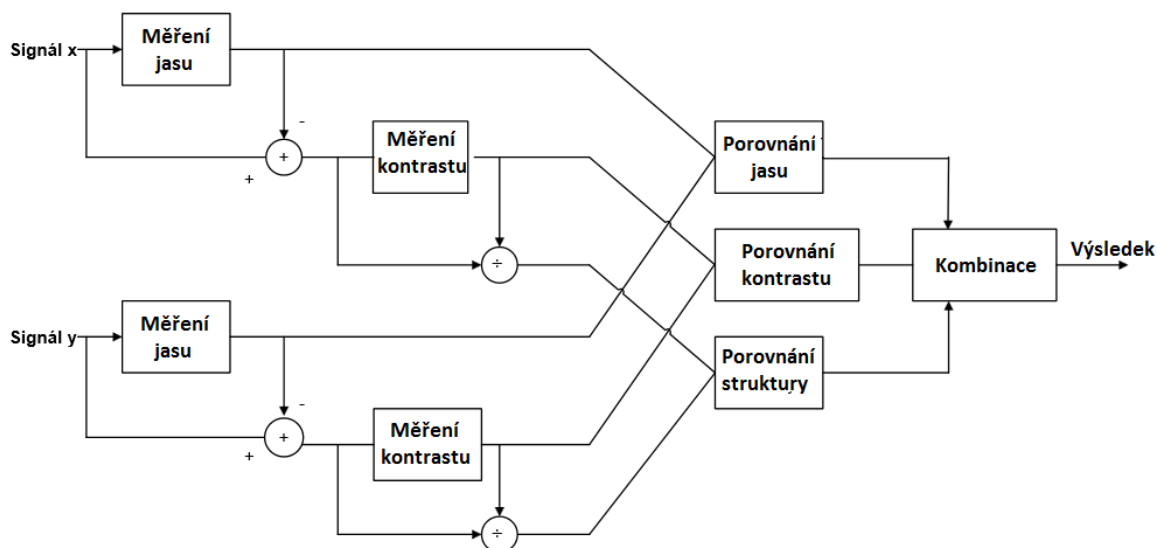
Metoda MSE (Mean Square Error), představuje střední kvadratickou odchylku přijatého videosignálu od originálního. Tato metoda se počítá následujícím vzorcem 8.1, kde:  $I$  je originální obraz,  $\tilde{I}$  přijatý obraz,  $x$  počet pixelů na výšku obrazu,  $y$  počet pixelů obrazu na šířku,  $T$  počet snímků.

$$MSE = \frac{1}{TXY} \sum_t \sum_x \sum_y [I(t, x, y) - \tilde{I}(t, x, y)]^2 [-] \quad (8.1)$$

Související metoda PSNR (Paek signal-to-nois ratio), znázorňuje poměr nejvyšší hodnoty signálu vůči hodnotám MSE, udává se v decibelech [21].

### 8.2.2 SSIM

Metoda SSIM (Structural similarity index), zohledňuje lidský vizuální systém. Metoda porovnává jas, kontrast a strukturální podobnost originálního s přijatým snímkem a slučuje je do jedné konečné hodnoty, která určuje kvalitu testovací sekvence (viz. obr. 8.1). SSIM je navržen ke zlepšení předešlých metrik jako MSE a PSNR, které se ukázaly být v rozporu s lidským vnímáním. Referenční hodnoty SSIM jsou v intervalu [0,1], kde 0 znamená nulový vztah k originálnímu obrázku a 1 je docíleno při porovnání dvou totožných obrázků [21].



Obrázek 8.1: Blokové schéma pro výpočet metody SSIM

### 8.3 MSU Video Quality Measurement

Z důvodu matematické složitosti a časové náročnosti výpočtů objektivních metod jsem použil volně distribuovanou aplikaci (viz. DVD příloha č. 20) pro měření, analýzy a porovnání kvality multimediálních video souborů ve formátech AVI, AVS, YUV, BMP, WMV, MOV a dalších. Tato aplikace podporuje metriky PSNR (Y,U,V,L,R,G,B), Delta, MSAD, MSE, SSIM, VQM (Video Quality Metric), MSU. Všechny zjištěné informace lze exportovat do CSV (Comma Separated Values) souboru [29].

### 8.4 Bitrate Viewer

Hlavním principem tohoto nástroje je analyzovat všechny MPEG videosekvence a vytvořit histogram kvality videosekvencí. Výstupem rozboru je průměrný, minimální a maximální bitrate, zobrazení bitratu u jednotlivých snímků a další. Program je volně šiřitelný.

## 9 Simulace provozu a měření kvality IPTV

Simulace provozu byla prováděna spuštěním čtyř multicastových skupin z IPTV serveru, které pomocí protokolu IGMP rozdělovala OLT jednotka, jednotlivým koncovým účastníkům. Tito účastníci stahovali z datového serveru libovolná data.

Pro přerozdělení služeb je v praxi možné využít VLAN (Virtual Local Area Network) s cílem učinit logickou organizaci sítě nezávislou na fyzické vrstvě, čímž lze usnadnit správu sítě, zvýšit její výkon a podpořit bezpečnost. Tímto nastavením by bylo možné dosáhnout přidělení jen těch konkrétních služeb, které by si eventuálně koncový účastník objednal. Pro měření kvality IPTV, však tohoto nastavení nebylo potřeba.

### 9.1 Testovací videosekvence

Testovací videosekvence (viz. tab. 11) jsem vybral tak, aby byly srovnatelné s videosekvencemi v metodě EtherSAM. Také jsem kladl důraz na velmi rychlé scény, které zvyšují lokální bitrate a pestré barvy snímků pro výraznější porovnávání objektivní metodou. K ověření všech parametrů, jsem použil program bitrate viewer, jehož grafický výstup u jednotlivých videosekvencí je uveden v příloze (viz. DVD příloha č. 29,30,31).

V tabulce (viz. tab. 11) je též ověřena rozdílná komprese kodeků MPEG-2 a MPEG-4. U kodeku MPEG-2 ve videu 4 dochází k menší kompresi a tím k většímu nárůstu průměrného bitrate než u kodeku MPEG-4 ve videu 2 stejného typu HDTV.

*Tabulka.11: Parametry testovaných videosekvencí*

jméno	typ	kodek	formát	délka [s]	rozlišení [px]	
-	-	-	-	-	horizontálně	vertikálně
video1	SDTVi	MPEG-2	mpeg	19	720	576
video2	HDTVp	MPEG-4	avi	20	1280	720
video3	HDTVp	MPEG-2	avi	21	1280	720
jméno	pixel [Mpx]	Bitrate [Mbps]			snímek [fps]	snímků
-	-	průměrný	maximální	minimální	-	-
video1	0,4	2,7	17,697	0,733	50	504
video2	0,9	12	51,167	4,385	24	480
video3	0,9	14,1	148	0,259	60	1272

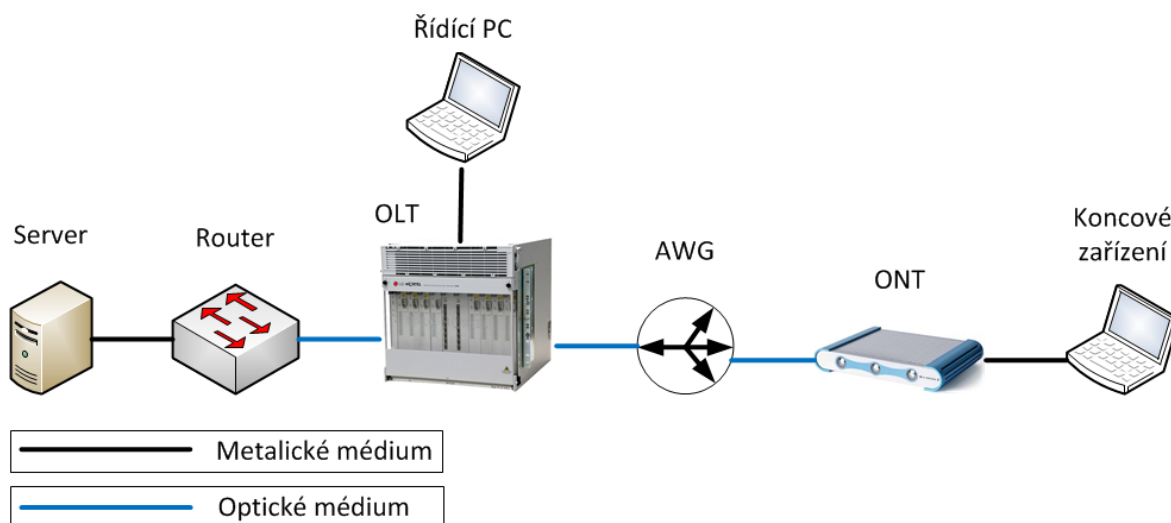
### 9.2 Hodnocení kvality objektivními metodami

V této části práce jsem se zabýval postupným testováním specifických vzorků (viz. tab. 11) objektivními metodami MSE a SSIM. Vzorky jsem po průchodu přístupovou sítí nahrával na notebooku, na konci této sítě, programem VLC. V programu byla možnost autodetekce nahrávání začátku a konce, streamování IPTV serveru. Tudíž délka času originálu odpovídala přesně délce času nahrávky, což je velmi důležité u objektivních metod. U vzorků byla zkoumána změna kvality při snižování propustnosti a zvyšování vzdálenosti koncových jednotek od jednotky OLT. Z počátku bylo možné snižovat nebo zvyšovat hodnoty hruběji, protože kvalita videa byla neměnná, ale jakmile jsem

se přiblížil k průměrné hodnotě bitrate, začal jsem hodnoty snižovat nebo zvyšovat po menších skocích. Jako poslední měření jsem zařadil postupné zatěžování ONU jednotek.

### 9.2.1 Postupné snižování propustnosti přístupové sítě

V tomto měření (viz. obr. 9.1) jsem pomocí řídicího počítače měnil hodnoty služby QoS a snižoval propustnost přístupové sítě v rozmezí 100 – 5 Mbps a následnou kvalitu IPTV vyhodnocoval objektivní metodou. Hodnoty tohoto měření jsou vidět v tabulce (viz. tab. 12).



Obrázek 9.1: Topologie zapojení sítě pro měření kvality postupného snižování propustnosti

Při snižování propustnosti sítě docházelo ke ztrátám snímků u videosekvencí IPTV. V tabulce (viz. příloha A č. 1.1) je teoretický výpočet počtu snímků při dané propustnosti. Z grafu (viz. příloha A č. 1.1) následně vyplývá, že pouze tyto snímky by měly být ztraceny. Jak ovšem můžeme vidět, nahrávka videa, která prošla simulovanou sítí má vždy v průměru o 7% snímků méně, než bylo dáno výpočtem. Tento jev nastává z důvodu nedokonalého zpracování streamu IPTV na přístrojích. Tudíž můžeme předpokládat o něco nižší kvalitu IPTV než nastavíme u QoS.

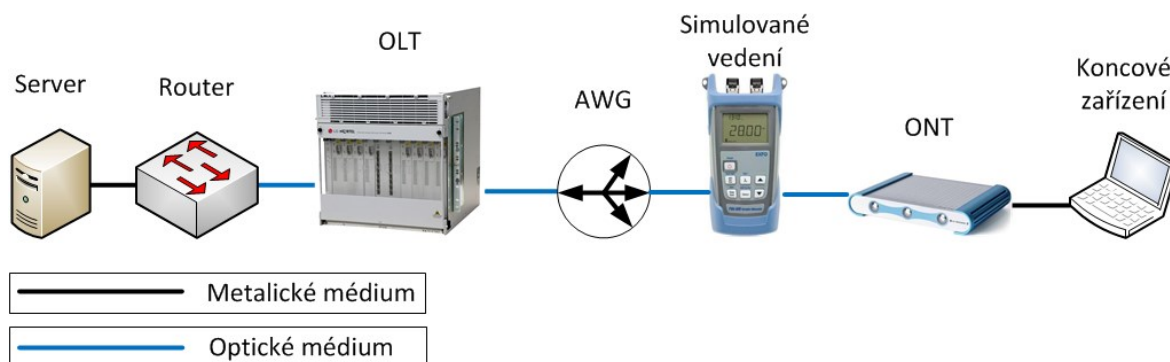


Tabulka.12: Výsledky objektivních metod při vlivu QoS na kvalitu IPTV

QoS [Mbps]	SSIM [-]			MSE [-]		
	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2
100000	0,988	0,988	1,000	27,3	31,5	33,5
90000	-	-	-	-	-	-
80000	-	-	-	-	-	-
75000	-	-	-	-	-	-
70000	-	0,997	1,000	-	55,9	83,4
65000	-	-	-	-	-	-
60000	-	0,944	1,000	-	149,1	283,1
55000	-	-	-	-	-	-
50000	0,988	0,932	1,000	30,5	250,6	366,5
45000	-	-	-	-	-	-
40000	-	0,932	1,000	-	282,0	416,0
35000	-	0,920	0,994	-	293,9	427,9
30000	0,987	0,916	0,992	37,2	385,0	519,0
25000	-	0,916	0,987	-	513,4	647,4
20000	-	0,919	0,987	-	523,1	657,1
17500	-	0,910	0,984	-	577,3	711,3
15000	0,986	0,898	0,981	32,2	688,9	822,9
12500	-	0,893	0,932	-	737,1	871,1
10000	0,985	0,883	0,893	34,8	770,2	1043,7
7500	-	0,872	0,891	-	818,8	1514,9
5000	0,985	0,854	0,884	35,9	1250,2	2023,1
3750	0,980	-	-	38,9	-	-
3000	0,980	-	-	42,9	-	-
2500	0,977	-	-	49,1	-	-
2250	0,972	-	-	51,5	-	-
2000	0,972	-	-	56,8	-	-
1750	0,972	-	-	60,5	-	-
1500	0,957	-	-	81,4	-	-
1250	0,936	-	-	358,2	-	-
1000	0,935	-	-	476,9	-	-
750	0,924	-	-	423,9	-	-
500	0,904	-	-	413,4	-	-

### 9.2.2 Postupné zvyšování vzdálenosti přístupové sítě

V následujícím měření (viz. obr. 9.2) jsem využil simulátor vedení, který jsem zapojil do série mezi AWG a ONU jednotku. V tomto měření jsem zkoumal změnu kvality IPTV při změně délky přístupové sítě. Délku trasy jsem simuloval zvyšováním útlumu v simulátoru vedení, kde jeho funkce je vysvětlena v kapitole č. 5. Útlum vedení jsem volil v rozmezí 1,55 – 20,55 dB. Pro přepočet útlumu na délku trasy podle vzorce 5.1 je použito vlákno ITU-T G. 652 D s měrným útlumem 0,28 dB/km, což odpovídá 6 – 73 km. Hodnoty tohoto měření jsou vidět v tabulce (viz. tab. 13).



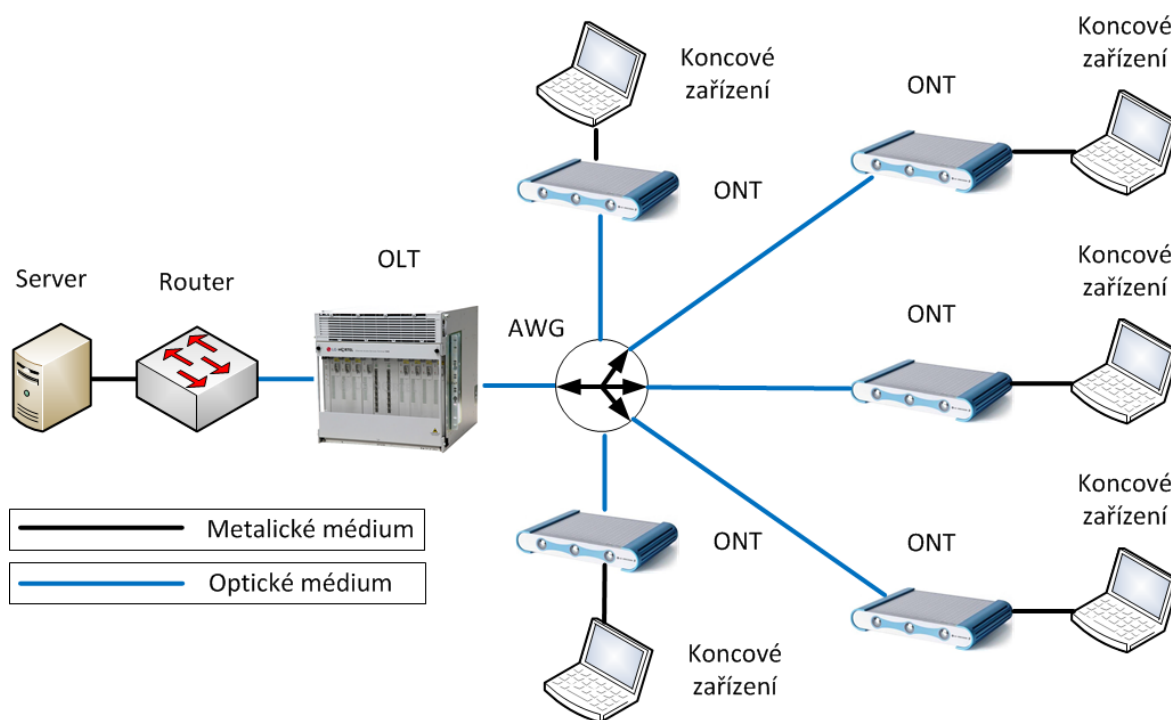
Obrázek 9.2: Topologie zapojení sítě pro měření kvality postupného zvyšování vzdálenosti přístupové sítě

Tabulka.13: Výsledky objektivních metod při vlivu délky vedení na kvalitu IPTV

Vzdálenost [km]	SSIM [-]			MSE [-]		
	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2
6	0,990	0,990	0,990	29,5	31,6	32,0
18	0,990	0,990	0,990	30,3	32,8	32,5
36	0,990	0,990	0,990	31,4	33,0	34,4
54	0,990	0,990	0,990	32,8	33,7	33,8
57	0,988	0,993	0,992	35,0	37,0	38,2
61	0,987	0,993	0,991	41,6	75,5	80,5
62	0,983	0,915	0,902	69,8	144,5	155,4
63	0,974	0,907	0,901	99,3	176,0	181,3
63	0,972	0,872	0,876	111,5	337,5	340,0
64	0,932	0,888	0,889	375,2	442,6	445,7
65	0,906	0,883	0,883	445,9	564,8	582,5
66	0,893	0,870	0,879	1077,6	891,3	901,1
67	0,854	0,857	0,867	1432,8	1237,4	1488,0
68	0,754	0,843	0,843	2432,8	1771,9	2134,0
69	0,754	0,839	0,833	3432,8	2235,4	2889,0
70	nepřehraje	nepřehraje	nepřehraje	nepřehraje	nepřehraje	nepřehraje
72	nepřehraje	nepřehraje	nepřehraje	nepřehraje	nepřehraje	nepřehraje
73	odpojení	odpojení	odpojení	odpojení	odpojení	odpojení

### 9.2.3 Postupné zatěžování ONU jednotek

V tomto měření (viz. obr. 9.3) jsem využil veškerých prostředků v optické laboratoři a zapojil jsem všechny ONU jednotky, ke kterým byl dále připojen přenosný počítač. Na všech počítačích bylo spuštěno stahování z datového serveru a spuštěno nej kvalitnější dostupné video z IPTV. V tomto měření jsem se zabýval změnou kvality IPTV při zvyšování zátěže na OLT jednotce. V každém kroku jsem vždy připojil navíc jednu ONU jednotku s přenosným počítačem. Autentické zobrazení simulace je uvedeno v příloze (viz. DVD příloha č. 21). Hodnoty tohoto měření jsou vidět v tabulce (viz. tab. 14).



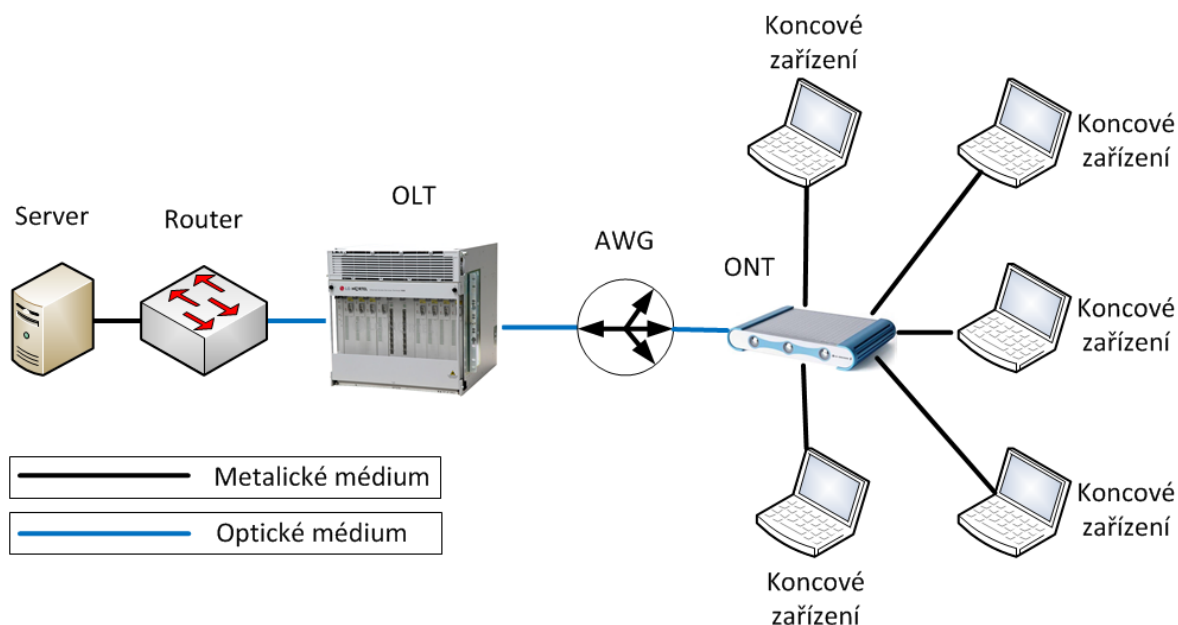
Obrázek 9.3: Topologie zapojení sítě pro měření kvality postupného zvyšování zátěže ONU jednotek

Tabulka.14: Výsledky objektivních metod při vlivu zátěže na kvalitu IPTV

Počet ONU [-]	SSIM [-]			MSE [-]		
	SDTV MPEG- 2	HDTV MPEG- 4	HDTV MPEG- 2	SDTV MPEG- 2	HDTV MPEG- 4	HDTV MPEG-2
5	0,988	0,998	0,997	27,6	28,5	27,3
4	0,987	0,987	0,987	27,3	27,4	27,9
3	0,987	0,987	0,987	24,5	25,6	26,6
2	0,988	0,997	0,987	26,6	25,9	27,3
1	0,988	0,988	0,988	27,8	27,9	28,5

### 9.2.4 Postupné zatěžování portů u ONU jednotky

V posledním měření (viz. obr. 9.4) jsem využil všech portů v ONU jednotce, k nimž jsem připojil přenosné počítače. V tomto měření jsem se zabýval změnou kvality IPTV při zvyšování zátěže na jednom kanálu. V každém kroku jsem vždy připojil jeden přenosný počítač navíc. Bylo spuštěno stahování z datového serveru a zároveň běželo přehrávání nejkvalitnějšího dostupného videa z IPTV. Autentické zobrazení simulace je uvedeno v příloze (viz. DVD příloha č. 22). Hodnoty tohoto měření jsou vidět v tabulce (viz. tab. 15).



Obrázek 9.4: Topologie zapojení sítě pro měření kvality postupného zvyšování portů ONU jednotky

Tabulka.15: Výsledky objektivních metod při vlivu zátěže kanálu na kvalitu IPTV

Počet portů [-]	SSIM [-]			MSE [-]		
	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2
4	0,987	0,964	0,954	47,3	52,3	58,5
3	0,988	0,965	0,961	40,4	41,5	44,9
2	0,988	0,978	0,977	39,2	41,5	42,3
1	0,99	0,998	0,998	27,7	27,6	27,7

### 9.3 Hodnocení kvality metodou EtherSAM

ITU-T Y.1564 je nový standard pro testování Ethernetových služeb, který nahrazuje doporučení RFC2544. Hlavní předností EtherSAMu je testování parametrů kritických pro real-time, služby v rámci jediného testu (propustnost, ztrátovost, zpoždění, jitter, OoS (Out of Sequence), QoS). Dalším benefitem je možnost testování výkonnosti distribuční infrastruktury až deseti souběžných datových toků reprezentujícími jednotlivé služby (data, hlas, video apod.).

#### **EtherSAM nabízí dvě fáze testování:**

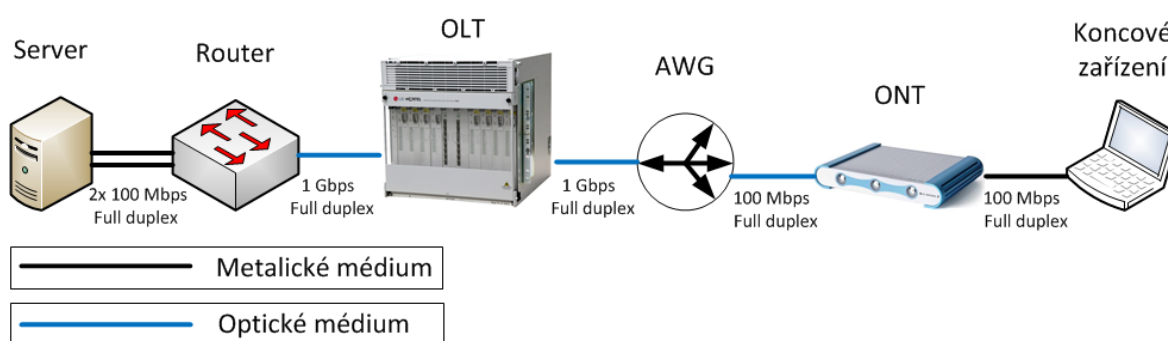
- První fáze prověří správnost konfigurace aktivní technologie pro každou nadefinovanou službu (nastavení QoS, bufferů apod.). Časová náročnost této fáze testu vychází z počtu nadefinovaných služeb, přičemž je počítáno cca s 1 minutou na službu.
- Při druhé fázi dojde k ověření výkonnosti sítě, v případě současné distribuce všech nadefinovaných služeb. Délka této fáze je uživatelsky volena, díky čemuž je možno provést definovaný test v délce např. v 5 minut nebo 24 hodin, což RFC2544 neumožňovalo.

EtherSAM umožní získat okamžitý přehled o výkonnosti a stabilitě nejen při aktivaci sítě, ale také při jejím následném servisu. EtherSAM rovněž představuje perfektní nástroj pro stanovení a ověření SLA (Service Level Agreement) parametrů v síti. Časová nenáročnost testování pak umožní snížit nejen reakční doby, ale také provozní náklady [16].

Všechny varianty měření, které jsem v předchozí kapitole vyhodnotil objektivními metodami jsem změřil i standardem EtherSAM. Výsledky a topologie zapojení jsou uvedeny v příloze (viz. příloha B - C).

## 10 Vyhodnocení výsledků měření

V základní topologii (viz. obr. 10.1) jsou rozepsány hodnoty propustnosti sítě mezi jednotlivými uzly. Nejužší místo se nachází mezi AWG a koncovým účastníkem, kde je možno dosáhnout maximálně 100 Mbps. Konektivitu OLT jednotky zajišťuje router Zyxel, který může přenášet až 1 Gbps v obou směrech současně. OLT jednotka tudíž rozděluje tuto rychlost mezi 32 kanálů, po připojení více jak 10 účastníků může rychlost klesnout až na 31 Mbps, což by bylo u některých přenosů IPTV nedostačující. V této bakalářské práci jsem však z důvodu nedostačujícího zařízení nemohl tuto situaci vyzkoušet.

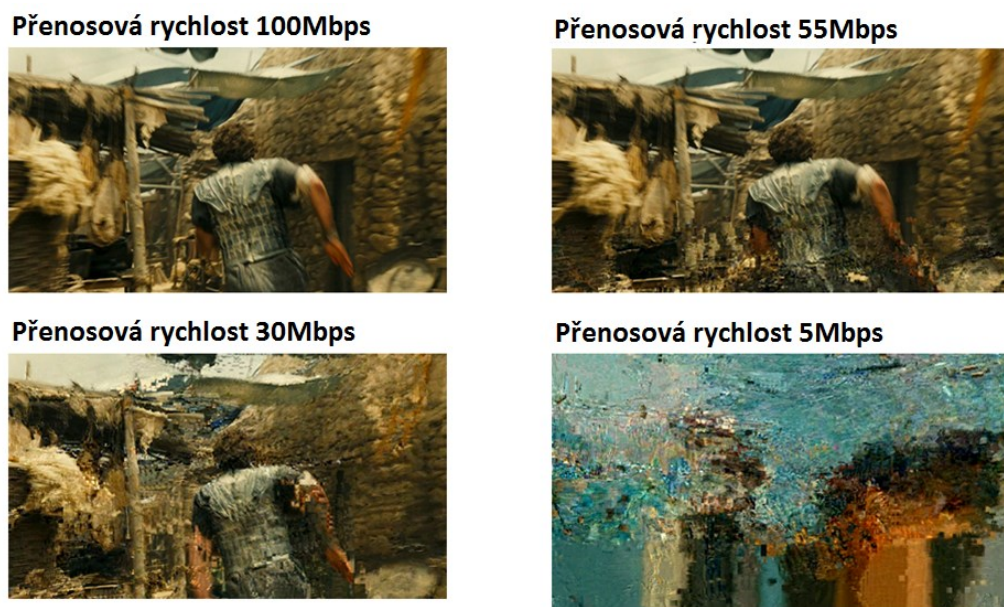


Obrázek 10.1: Základní topologie zapojení simulované sítě s rychlostmi linek.

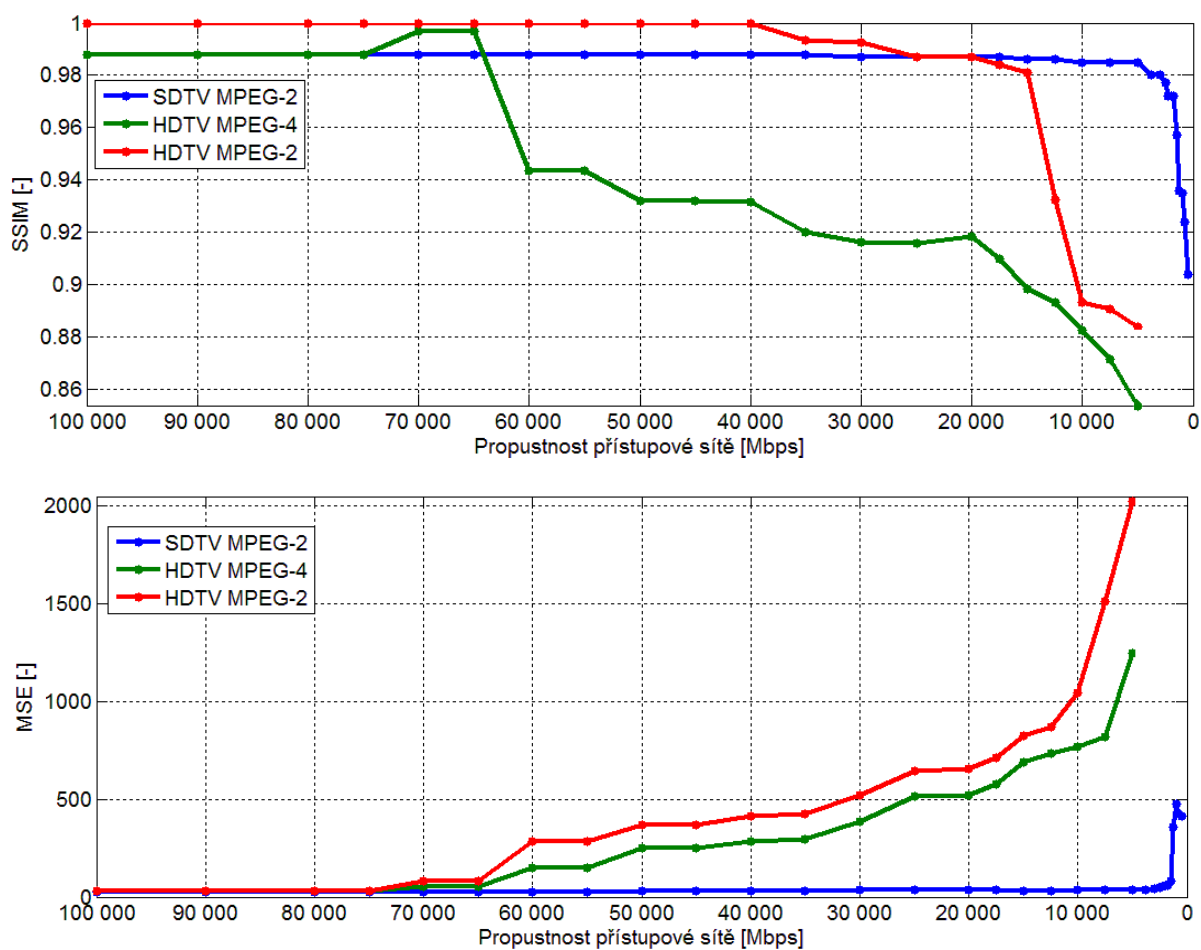
### 10.1 Vliv propustnosti na kvalitu IPTV

Při snižování propustnosti docházelo od určité hranice ke snížení kvality videa IPTV. Hranice byla rozdílná vzhledem ke kvalitě videosekvencí. HDTV v kompresním formátu MPEG-2 má největší průměrný bitrate a z grafu (viz. obr. 10.3) lze usoudit, že jeho kvalita se začíná zhoršovat dříve a strměji, než u zbývajících vzorků. HDTV v obou kompresích MPEG-2 i MPEG-4 přestali fungovat současně a to při propustnosti sítě 5Mbps. Video s nejhorší kvalitou SDTV fungovala po celou dobu.

Snížení kvality bylo znatelné i při subjektivním hodnocení, kde se s postupným snižováním přenosové rychlosti, začal projevovat Jitter a Latence. Tyto chyby jsou vidět při porovnání snímku 245 ve videu2 při odlišných přenosových rychlostech, které jsem nastavoval na OLT jednotce (viz. obr. 10.2). Tyto snímky jsou samostatně v plné kvalitě uvedeny v příloze (viz. DVD příloha č. 32,33,34,35).



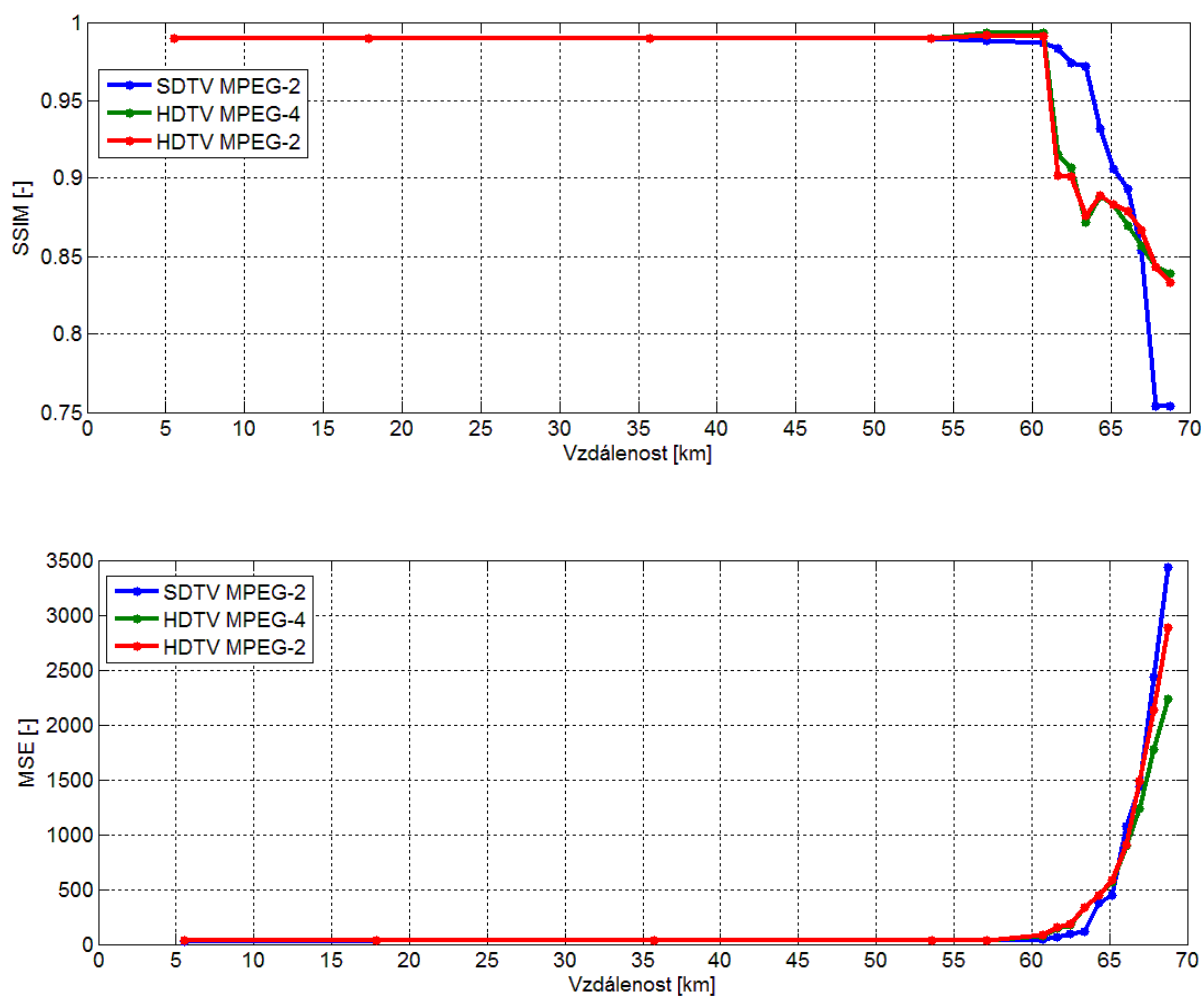
Obrázek 10.2: Zachycené snímky z videosekvence video2 při různých hodnotách QoS



Obrázek 10.3: Výsledky objektivních metod při vlivu QoS na kvalitu IPTV

## 10.2 Vliv vzdálenosti na kvalitu IPTV

Při zvyšování vzdálenosti docházelo ke změně kvality u všech vzorků současně, bez ohledu na jejich kvalitu a její odpovídající bitrate. Dle grafu (viz. obr. 10.4) první změny kvality nastaly kolem 60 km. S dalším nárůstem vzdálenosti se video začalo zhoršovat natolik, že při dosažené vzdálenosti 68 km se video úplně zastavilo a po dalších 5 km se ONU jednotka úplně odpojila.



Obrázek 10.4: Výsledky objektivních metod při vlivu délky vedení na kvalitu IPTV



### 10.3 Vliv zatížení na kvalitu IPTV

Měření zátěže zvyšováním počtu připojených ONU jednotek se na zhoršení kvality videa vůbec neprojevila. Z čehož můžu usoudit, že OLT jednotka měla dostatečnou konektivitu, aby mohla obsloužit všechny připojené ONU jednotky.

V měření změny kvality vlivem postupného zatěžování ONU jednotky, tedy jednoho kanálu, se projevilo zanedbatelnou ztrátou snímků, která neovlivnila zhoršení kvality videa IPTV.

### 10.4 Porovnání výsledků objektivní metody se standartem EtherSAM

Výsledky obou metod odpovídaly očekávání a jejich výsledky jsou velmi totožné. Odlišnost nastává pouze v hraničních hodnotách, kde u metody EtherSAM jsou posunuté a změna kvality začíná dříve než u objektivních metod. Toto posunutí je zapříčiněno nestejnými videosekvencemi. Testovací videosekvence jsou v metodě EtherSAM kvalitnější než u videosekvencí popisovaných v kapitole č. 9.

## 11 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou optických přístupových sítí nové generace, zejména WDM-PON, Ericsson-Nortel, Release 3. Na této technologii byla testována řada měření služby IPTV v rámci služby Triple Play. Tuto službu jsem několika způsoby testoval za simulovaného provozu v optické přístupové síti a zkoumal dostačující kvalitu pro korektní chod IPTV. Nezbytnou součástí bylo použití několika sofistikovaných zařízení firmy EXFO.

V teoretické části jsem shrnul vývoj optických přístupových sítí nové generace a rozebral jejich funkci, která má odlišnou funkci od stávající optické přístupové sítě. Vývoj této sítě je momentálně na samém začátku. Jelikož tato síť má zajistit zvyšující se nároky na přenos dat bude se v tomto vývoji zcela jistě pokračovat. Zprovoznění některých dalších technologií spadajících pod tuto oblast sahá až do roku 2030.

V praktické části jsem ověřoval parametry WDM-PON Ericsson-Nortel, Release 3 a multiplexeru AWG, který je nedílnou součástí. Všechny naměřené hodnoty byly v souladu s očekávanými parametry, které udává výrobce. Pro další měření a distribuci IPTV byla nezbytná konfigurace zařízení, jako je nastavení protokolů na aplikační, transportní a síťové vrstvě. V první části jsem se zaměřil na vyhodnocení kvality obrazu a videosignálu objektivními metodami SSIM a MSE. Za simulovaného provozu bylo spuštěno pomocí programu VLC streamování IPTV z IPTV serveru a u koncového účastníka nahráváno. Vyhodnocení změn videosekvencí jsem realizoval programem MSU Video Quality, který podporoval již zmíněné objektivní metody. V další části měření jsem stejné topologie měřil metodou EtherSAM pro ověření výsledků předchozí metody.

Z vykonaných měření jsem zjistil, že kvalita služeb spojených s přenosem obrazu a videosignálu je značně závislá na propustnosti sítě. Kde při nízkých přenosových rychlostech docházelo ke ztrátě snímků a k zhoršení až k úplné ztrátě služby IPTV. Pro HDTV je nezbytná přenosová rychlost 70 Mbps a u SDTV 1,5 Mbps, čím vyšší kvalitu videa streamujeme, tím vyšší šířku pásma tedy potřebujeme. Kvalita obrazu je závislá na vzdálenosti, kde při 60km začíná útlum optického kabelu být natolik vysoký, že síla signálu nedokáže optimálně přenášet službu IPTV a dochází opět ke zhoršení kvality. V posledním měření, jehož cílem bylo dokázat zhoršení kvality při zvyšování zátěže počtem ONU jednotky. To se bohužel nepotvrdilo, z důvodu nedostačujících zařízení, kterými bych technologii OLT jednotku dokázal vytížit.

## Použitá literatura

- [1] TANAKA, K., A. AGATA a Y. HORIUCHI. IEEE 802.3av 10G-EPON Standardization and Its Research and Development Status. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 2010, vol. 28, issue 4, s. 651-661 [cit. 2013-05-01]. DOI: 10.1109/jlt.2009.2038722. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5371994>
- [2] VENDRELL RIBEIRO, Rafael. Passive Optical Network (PON): WDM-PON: Wavelength Dimension Multiplexing PON. In: [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: [http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2008\\_2/rafael\\_ribeiro/WDM-PON.html](http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/rafael_ribeiro/WDM-PON.html)
- [3] PRAT, Josep. *Next-generation FTTH passive optical networks*. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-140-2084-690.
- [4] LAFATA, Pavel. Pasivní optické sítě WDM-PON. [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050004>
- [5] *Návrh, výstavba a měření optických přístupových sítí*. Brno, 2011. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38742](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38742). Diplomová práce. UTKO. Vedoucí práce Ing. Vladimír Tejkal.
- [6] ŠIŠKA, Ing. Petr, PhD., Ing. Jan LÁTAL, Ing. Petr KOUDELKA, Ing. Miroslav HLADKÝ a Prof. RNDr. Vladimír VAŠINEK, CSC. *Experimentální pracoviště DWDM-PON na VŠB-TU Ostrava* [HDD]. 2010[cit. 2013-05-01].
- [7] VODRÁŽKA, Jan. Optické přístupové sítě EPON a CWDM. In: *Optické přístupové sítě EPON a CWDM* [online]. 2005 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=&cisloclanku=2005070401>
- [8] LAM, Cedric F. *Passive optical networks: principles and practice*. Boston: Elsevier/Academic Press, c2007, xlv, 324 p. ISBN 01-237-3853-9.
- [9] G.694.1. <i>Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid</i>. 2012. vyd. 2012: ITU-T, 2012. Dostupné z: [http://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-I!!PDF-E&type=items](http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.694.1-201202-I!!PDF-E&type=items)
- [10] Next-Generation PON Evolution. In: *Next-Generation PON Evolution* [online]. 2010. vyd., 2010 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.huawei.com/en/static/hw-077443.pdf>
- [11] XINSHENG, Wang. Insights into Next-Generation PON Evolution. <i>Insights into Next-Generation PON Evolution</i> [online]. 2012, č. 4 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: [http://www.zte.com.cn/endata/magazine/ztechnologies/2012/no4/articles/201207/t20120712\\_325632.html](http://www.zte.com.cn/endata/magazine/ztechnologies/2012/no4/articles/201207/t20120712_325632.html)

- [12] ARNASON, Bernie. Next Generation FTTP Standard, NG-PON2, Begins to Emerge. In: *Next Generation FTTP Standard, NG-PON2, Begins to Emerge* [online]. 2012. vyd., 2012 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.telecompetitor.com/next-generation-ftp-standard-ng-pon2-begins-to-emerge/>
- [13] DICKMANN, Prof. Dr.-Ing. J. *FABRY PEROT RESONATOR* [online]. Philadelphia, 2003 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://repairfaq.ece.drexel.edu/sam/MEOS/EXP03.pdf>. Experiment. Drexel University.
- [14] Ericssonlg. ERICSSON-LG. *Ericssonlg* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: [1] <http://www.ericssonlg.com/index.html>
- [15] 323-1565-100. *Ethernet Access 1100: System Description*. 2008. vyd. Canada: Nortel Networks, 2008.
- [16] Profiber. *Profiber* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/>
- [17] VOLK, M., J. GUNA, A. KOS a J. BESTER. IPTV Systems, Standards and Architectures: Part II - Quality-Assured Provisioning of IPTV Services within the NGN Environment. *IEEE Communications Magazine* [online]. 2008, vol. 46, issue 5, s. 118-126 [cit. 2013-05-01]. DOI: 10.1109/MCOM.2008.4511660. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4511660>
- [18] What is Deinterlacing? Facts, solutions, examples. *What is Deinterlacing? Facts, solutions, examples*. [online]. 2010 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.100fps.com/>
- [19] IGMP, Internet Group Management Protocol. In: *Networksorcery* [online]. 2012 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.networksorcery.com/enp/protocol/igmp.htm>
- [20] RFC 3376. *Internet Group Management Protocol, Version 3*. 2002. Dostupné z: <http://tools.ietf.org/html/rfc3376>
- [21] Correlation between objective and subjective methods used for video quality evaluation. In: UHRINA, Miroslav, Jan HLUBIK a Martin VACULIK. *Correlation between objective and subjective methods used for video quality evaluation* [online]. 2012 [cit. 2013-05-01]. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2012.6225581. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6225581&contentType=Conference+Publications>
- [22] PÍŠTĚK, Petr. Multicast: skupinové vysílání. <i>Multicast: skupinové vysílání</i> [online]. 2011, č. 134 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.ics.muni.cz/bulletin/articles/134.html>
- [23] Vmware. <i>Vmware</i> [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.vmware.com/>

- [24] HONTAÑÓN, Ramón J. <i>Linux: praktická bezpečnost</i>. 1. vyd. Praha: Grada, 2003, 438 s. Profesionál. ISBN 80-247-0652-0.
- [25] Videolan. *Videolan* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.videolan.org>
- [26] Zyxel. *Zyxel* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: [www.zyxel.com](http://www.zyxel.com)
- [27] Forara. *Forara* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.forara.com>
- [28] KREJČÍ, J. a T. ZEMAN. Úvod do IPTV. In: *Úvod do IPTV* [online]. Úvod do IPTV, 2008 [cit. 2013-05-01]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008100002>
- [29] Compression. *Compression* [online]. 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.compression.ru/>

## Seznam příloh

### **A Výsledky ztrátovosti snímků při změně QoS**

### **B Topologie zapojení metodou EtherSAM**

### **C Výsledky měření metodou EtherSAM**

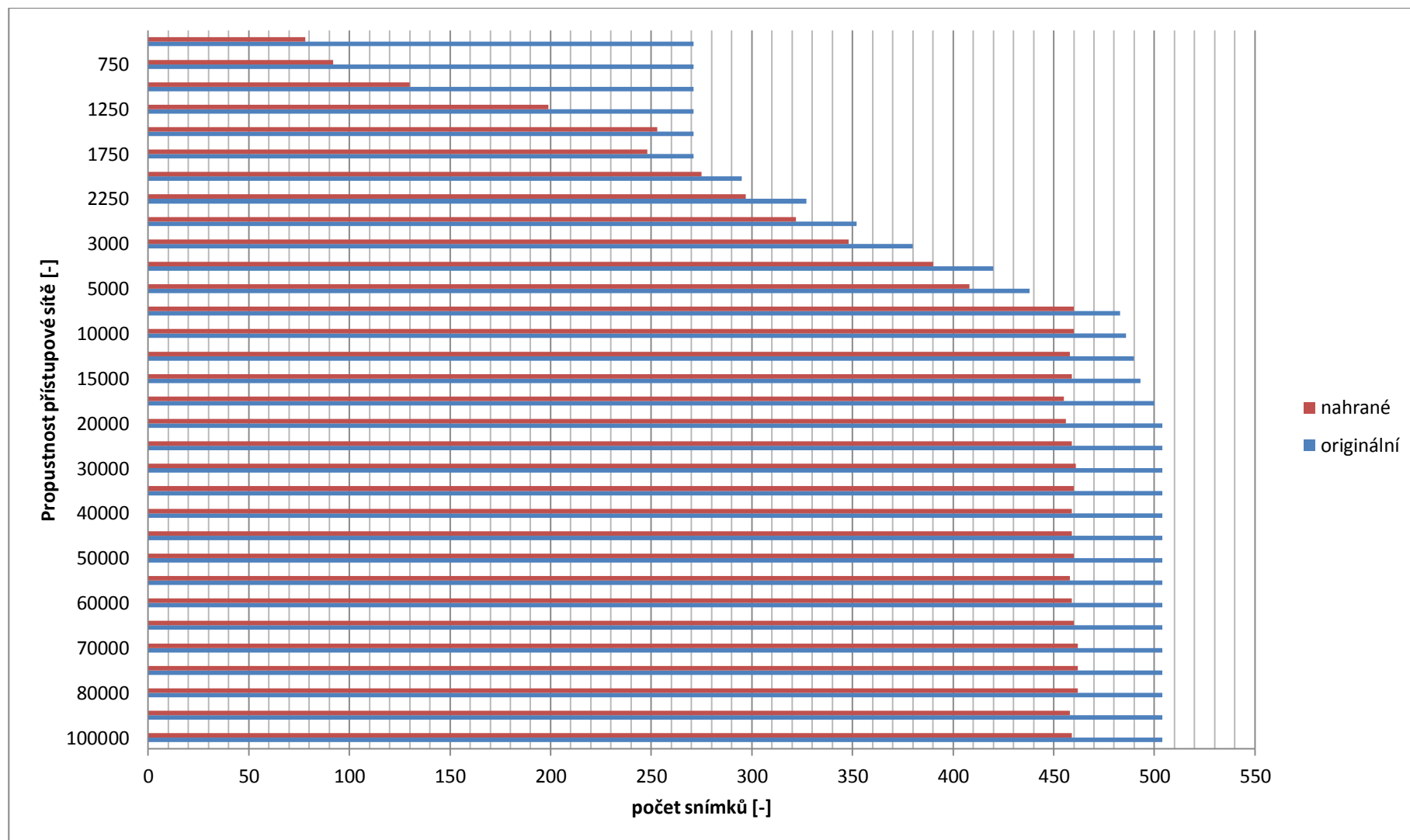
### **D Obsah DVD**

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1. Úvodní menu WDM-PON           | 19. Playlist IPTV v programu VLC          |
| 2. Karta Facility                | 20. MSU Video Quality Measurement         |
| 3. Karta DHCP IP Pool            | 21. Výstup IPTV                           |
| 4. Karta DHCP Reserve IP         | 22. Autentická topologie zapojení         |
| 5. Karta DHCP User               | 23. Nastavení OSA EXFO FTB-400            |
| 6. Karta IGMP Snooping Config    | 24. Topologie zapojení racků              |
| 7. Karta IGMP Snooping Group     | 25. Internetová stránka                   |
| 8. Karta IGMP Snooping Router    | 26. Zdrojový soubor index.php             |
| 9. Karta IGMP Snooping Statistic | 27. Zdrojový soubor streamu IPTV 1        |
| 10. Karta Port(PI)               | 28. Zdrojový soubor streamu IPTV 2        |
| 11. Dělič 90:10                  | 29. Parametry videa1                      |
| 12. ONU jednotka EARU 112        | 30. Parametry videa2                      |
| 13. Simulátor vedení FVA-60B     | 31. Parametry videa3                      |
| 14. OSA EXFO FTB-400             | 32. Video2 při přenosové rychlosti 100Mps |
| 15. Modul FTB 5240B              | 33. Video2 při přenosové rychlosti 55Mps  |
| 16. Router ZyXEL XGS-4528F       | 34. Video2 při přenosové rychlosti 30Mps  |
| 17. modul Forara FS3124L2D       | 35. Video2 při přenosové rychlosti 5Mps   |
| 18. Aktivace IGMP na routeru     |   |

## Příloha.A: Výsledky ztrátovosti snímků při změně QoS

Tabulka.1: Hodnoty ztrát snímků vlivem změny QoS

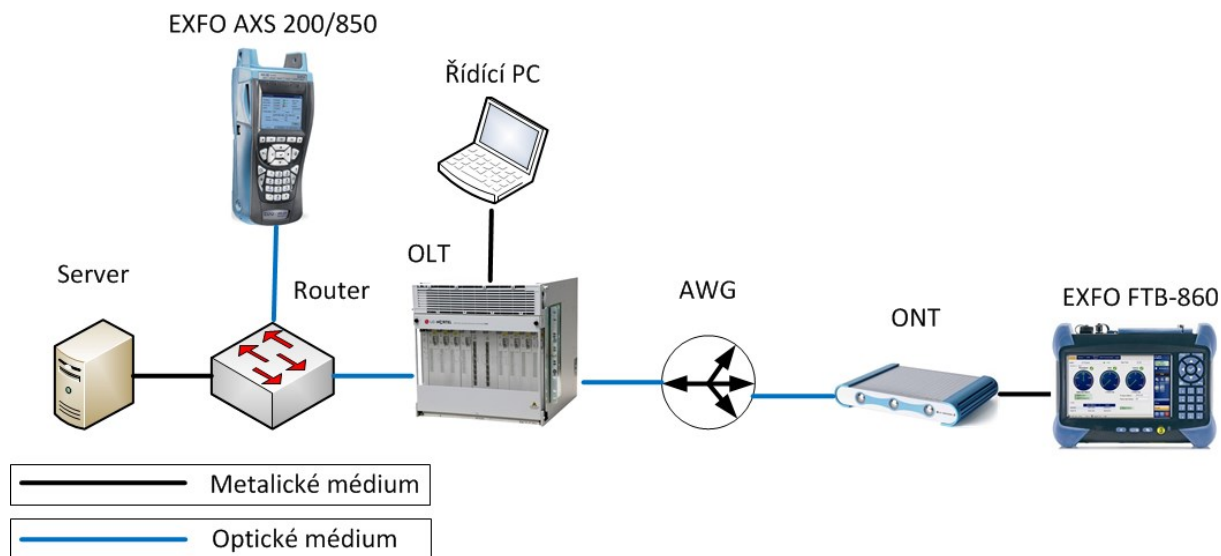
QoS [Mbps]	SDTV MPEG-2			HDTV MPEG-4 [snímek]			HDTV MPEG-2 [snímek]		
	Originál [snímek]	Nahrávka [snímek]	Rozdíl [%]	Originál [snímek]	Nahrávka [snímek]	Rozdíl [%]	Originál [snímek]	Nahrávka [snímek]	Rozdíl [%]
100000	504	459	-9	480	450	-6	1235	1190	-4
90000	504	458	-9	480	450	-6	1229	1138	-7
80000	504	462	-8	480	450	-6	1220	1132	-7
75000	504	462	-8	480	450	-6	1217	1141	-6
70000	504	462	-8	480	450	-6	1216	1127	-7
65000	504	460	-9	480	449	-6	1215	1146	-6
60000	504	459	-9	480	449	-6	1213	1136	-6
55000	504	458	-9	480	449	-6	1204	1121	-7
50000	504	460	-9	479	447	-7	1197	1104	-8
45000	504	459	-9	478	447	-6	1195	1117	-7
40000	504	459	-9	477	447	-6	1192	1099	-8
35000	504	460	-9	476	446	-6	1186	1110	-6
30000	504	461	-9	469	444	-5	1167	1068	-8
25000	504	459	-9	467	443	-5	1131	1044	-8
20000	504	456	-10	433	411	-5	1085	1020	-6
17500	500	455	-9	413	391	-5	1040	957	-8
15000	493	459	-7	390	368	-6	958	867	-9
12500	490	458	-7	284	262	-8	827	742	-10
10000	486	460	-5	204	182	-11	760	654	-14
7500	483	460	-5	113	91	-19	707	567	-20
5000	438	408	-7	11	2	-82	576	346	-40
3750	420	390	-7	-	-	-	-	-	-
3000	380	348	-8	-	-	-	-	-	-
2500	352	322	-9	-	-	-	-	-	-
2250	327	297	-9	-	-	-	-	-	-
2000	295	275	-7	-	-	-	-	-	-
1750	271	248	-8	-	-	-	-	-	-
1500	271	253	-7	-	-	-	-	-	-
1250	271	199	-27	-	-	-	-	-	-
1000	271	130	-52	-	-	-	-	-	-
750	271	92	-66	-	-	-	-	-	-
500	271	78	-71	-	-	-	-	-	-



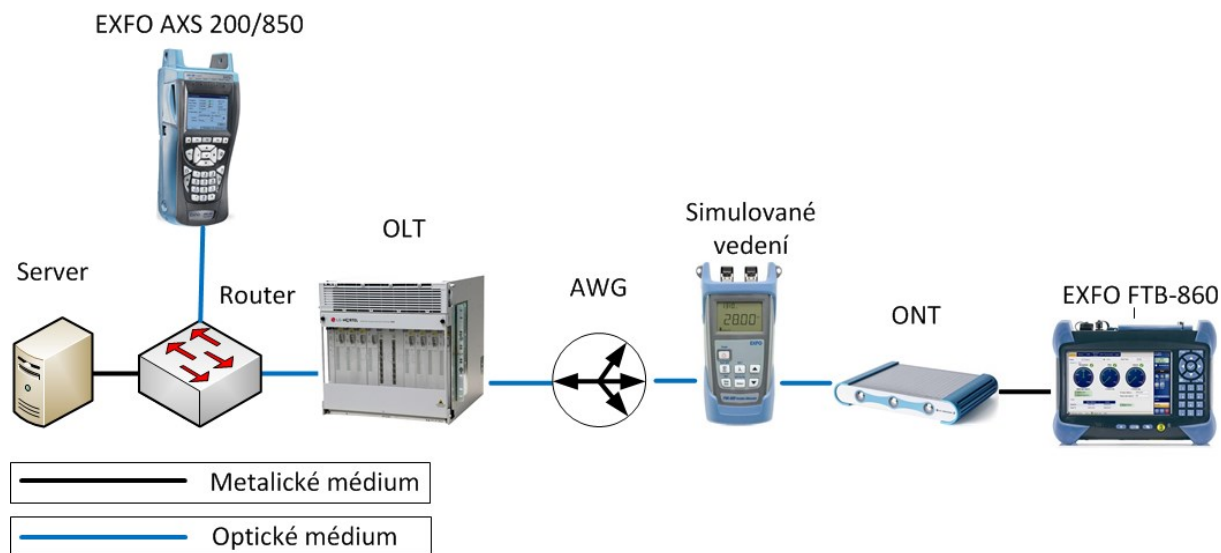
Obrázek 1.1: Hodnoty ztrát snímků vlivem změny QoS



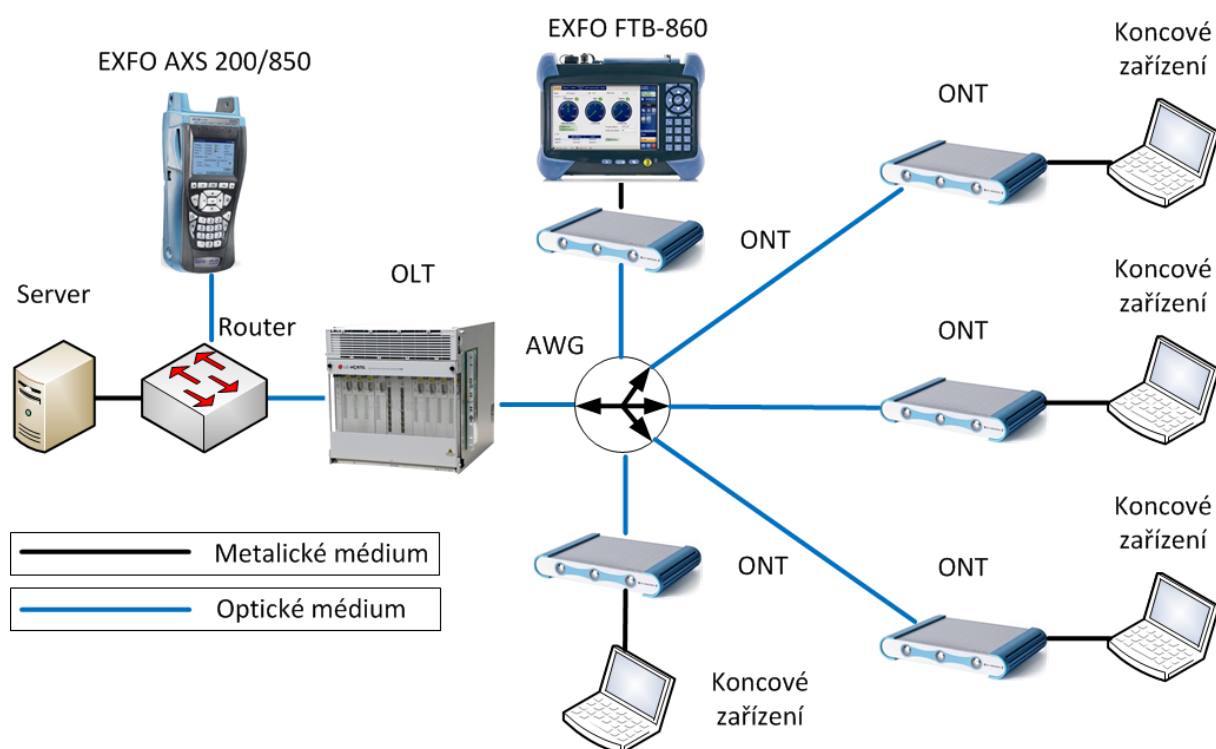
*Příloha.B: Topologie zapojení metodou EtherSAM*



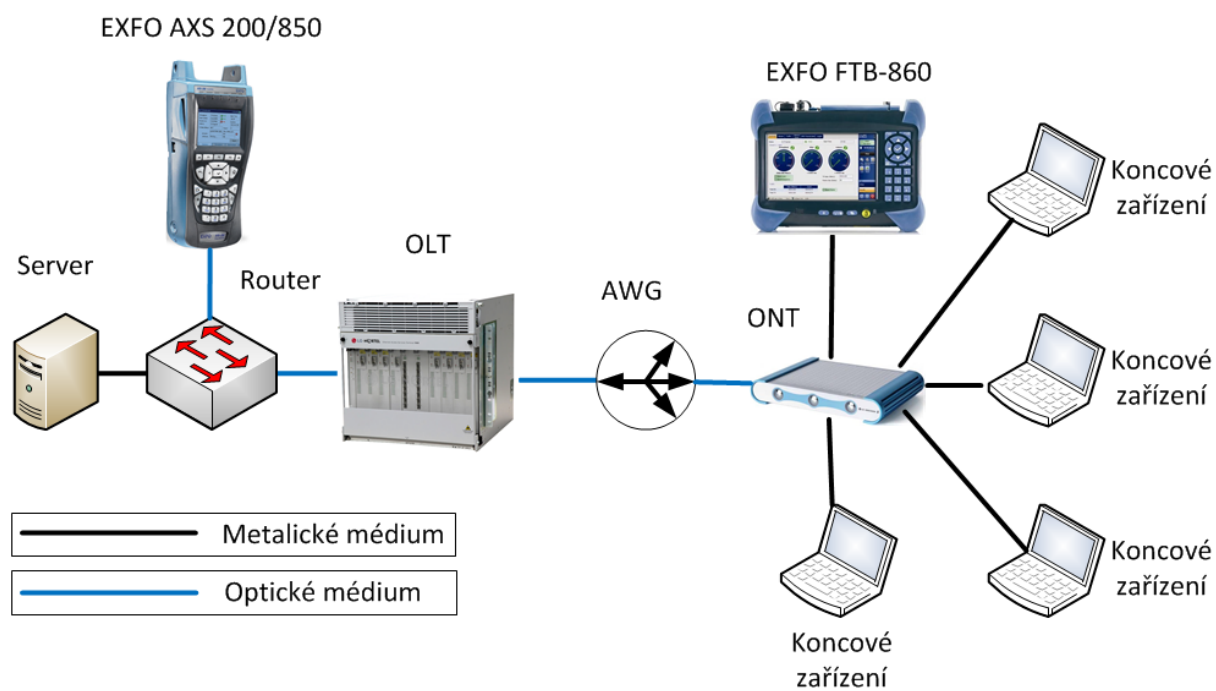
*Obrázek 2.1: Topologie zapojení sítě pro měření kvality postupného snižování propustnosti*



*Obrázek 2.2: Topologie zapojení sítě pro měření kvality postupného zvyšování vzdálenosti přístupové sítě*



Obrázek 2.3: Topologie zapojení sítě pro měření kvality postupného zvyšování zátěže ONU jednotek



Obrázek 2.4: Topologie zapojení sítě pro měření kvality postupného zvyšování portů ONU jednotky

## Příloha.C: Výsledky měření metodou EtherSAM

Tabulka.1: Výsledky metody EtherSAM při vlivu QoS na kvalitu IPTV (část 1.)

QoS [Mbps]	Max Jitter [ms]			Frame Loss [%]			Round-trip Latency [ms]			Max Throughput [Mbps]		
	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2
100000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
90000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
80000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
75000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
70000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
65000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
60000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
55000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
50000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
45000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
40000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
35000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
30000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
25000	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,972	10,623	20,502
20000	0,015	0,015	0,015	0	0	0,583	0,442	0,442	20,412	3,972	10,623	20,356
17500	0,015	0,015	0,162	0	0	12,928	0,442	0,442	30,963	3,972	10,623	17,79

Tabulka.2: Výsledky metody EtherSAM při vlivu QoS na kvalitu IPTV (část 2.)

QoS [Mbps]	Max Jitter [ms]			Frame Loss [%]			Round-trip Latency [ms]			Max Throughput [Mbps]		
	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2
15000	0,015	0,015	0,368	0	0	25,257	0,442	0,442	36,471	3,972	10,623	15,258
12500	0,015	0,015	0,653	0	0	37,662	0,442	0,441	43,833	3,972	10,623	12,726
10000	0,015	0,078	1,077	0	3,48	49,953	0,442	48,61	54,719	3,972	10,219	10,213
7500	0,015	0,789	1,776	0	27,335	62,349	0,442	71,469	72,786	3,972	7,661	7,661
5000	0,015	2,18	3,154	0	51,177	74,673	0,442	107,415	108,062	3,972	5,145	5,128
3750	0,153	-	-	2,423	-	-	98,461	-	-	3,854	-	-
3000	1,592	-	-	21,985	-	-	170,382	-	-	3,079	-	-
2500	2,815	-	-	33,38	-	-	204,183	-	-	2,593	-	-
2250	3,8265	-	-	39,93	-	-	230,419	-	-	2,332	-	-
2000	4,838	-	-	46,48	-	-	256,655	-	-	2,071	-	-
1750	6,251	-	-	52,748	-	-	293,608	-	-	1,812	-	-
1500	8,172	-	-	59,484	-	-	342,114	-	-	1,553	-	-
1250	10,797	-	-	66,019	-	-	408,425	-	-	1,294	-	-
1000	14,612	-	-	72,371	-	-	507,624	-	-	1,035	-	-
750	20,904	-	-	78,949	-	-	665,876	-	-	0,776	-	-
500	32,811	-	-	100	-	-	972,133	-	-	0,517	-	-

Tabulka.3: Výsledky metody EtherSAM při vlivu délky vedení na kvalitu IPTV

Vzdálenost [Km]	Max Jitter [ms]			Frame Loss [%]			Round-trip Latency [ms]			Max Throughput [Mbps]		
	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2	SDTV MPEG-2	HDTV MPEG-4	HDTV MPEG-2
6	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,441	0,441	0,441	3,984	10,623	20,502
18	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,441	0,441	0,441	3,984	10,623	20,502
36	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,441	0,441	0,441	3,984	10,623	20,502
54	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,441	0,441	0,441	3,984	10,623	20,502
57	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,441	0,441	0,441	3,984	10,623	20,502
61	0,015	0,015	0,015	0,03	0,26	0,044	0,441	0,441	0,441	3,983	10,62	20,502
62	0,015	0,015	0,015	0,058	0,058	0,04	0,441	0,441	0,441	3,982	10,617	20,494
63	0,015	0,015	0,015	0,136	0,106	0,074	0,441	0,441	0,441	3,978	10,612	20,487
63	0,015	0,015	0,015	0,415	0,305	0,183	0,441	0,441	0,441	3,967	10,59	20,464
64	0,015	0,015	0,015	1,018	0,908	0,524	0,441	0,441	0,441	3,942	10,528	20,396
65	0,015	0,015	0,015	2,322	2,266	1,104	0,441	0,441	0,441	3,889	10,382	20,275
66	0,015	0,015	0,015	5,23	5,722	2,77	0,441	0,441	0,441	3,776	10,016	19,93
67	0,015	0,015	0,015	12,282	12,742	6,782	0,441	0,441	0,441	3,492	9,267	19,106
68	0,015	0,015	0,015	27,716	25,992	15,995	0,441	0,441	0,441	2,877	7,863	17,223
69	0,015	0,015	0,015	55,511	51,016	37,472	0,441	0,441	0,441	1,625	5,209	12,81

Tabulka.4: Výsledky metody EtherSAM při vlivu zátěže na kvalitu IPTV

Počet ONU [-]	Max Jitter [ms]			Frame Loss [%]			Round-trip Latency [ms]			Max Throughput [Mbps]		
	SDTV MPEG- 2	HDTV MPEG- 4	HDTV MPEG- 2	SDTV MPEG- 2	HDTV MPEG- 4	HDTV MPEG- 2	SDTV MPEG- 2	HDTV MPEG- 4	HDTV MPEG- 2	SDTV MPEG- 2	HDTV MPEG- 4	HDTV MPEG- 2
5	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,984	10,623	20,502
4	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,984	10,623	20,502
3	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,984	10,623	20,502
2	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,984	10,623	20,502
1	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,984	10,623	20,502

Tabulka.5: Výsledky metody EtherSAM při vlivu zátěže kanálu na kvalitu IPTV

Počet obsazených portů [-]	Max Jitter [ms]			Frame Loss [%]			Round-trip Latency [ms]			Max Throughput [Mbps]		
	SDTV MPEG- 2	HDTV MPEG- 4	HDTV MPEG- 2	SDTV MPEG- 2	HDTV MPEG- 4	HDTV MPEG- 2	SDTV MPEG- 2	HDTV MPEG- 4	HDTV MPEG- 2	SDTV MPEG- 2	HDTV MPEG- 4	HDTV MPEG- 2
4	0,265	0,225	0,185	0,665	0,851	1,112	4,771	4,794	5,079	3,958	10,533	20,284
3	0,49	0,262	0,195	0,527	0,612	0,759	4,834	4,69	4,974	3,963	10,558	20,349
2	0,334	0,267	0,188	0,234	0,279	0,265	4,067	4,164	4,274	3,975	10,593	20,445
1	0,015	0,015	0,015	0	0	0	0,442	0,442	0,442	3,984	10,623	20,502